



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Beitrag zur Systemtheorie der Druckverfahren

Wolf, Klaus
(1970)

DOI (TUpriints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00013558>

License:



CC-BY 4.0 International - Creative Commons, Attribution

Publication type: Book

Division: 16 Department of Mechanical Engineering

16 Department of Mechanical Engineering

Original source: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/13558>

Beitrag zur Systemtheorie der Druckverfahren

Von der Fakultät für Maschinenbau
an der Technischen Hochschule Darmstadt
zur Erlangung
des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von
DIPL.-ING. KLAUS WOLF
aus Würzburg

Berichterstatter :	Prof. Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter
Mitberichterstatter :	Prof. Dr.-Ing. E. h. Karl Küpfmüller Prof. Dr.-Ing. Werner Kast
Tag der Einreichung :	11. 7. 1969
Tag der mündlichen Prüfung :	13. 1. 1970

Darmstadt 1970

Die vorgelegte Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl und Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren.

Herrn Professor Dipl.-Ing. Karl R. Scheuter, meinem hochverehrten Chef, danke ich herzlich für die Anregungen und richtungsweisende Förderung, für seinen Rat und ständige Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Den Herren Professoren Dr.-Ing. E.h. Karl Küpfmüller und Dr.-Ing. Werner Kast danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Korreferates.

Für die gute Zusammenarbeit bin ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes zu besonderem Dank verpflichtet.

Hiermit erkläre ich an Eides Statt,
daß ich die vorliegende Arbeit
— abgesehen von den ausdrücklich
genannten Hilfen —
selbständig verfaßt habe.

Klaus Voel

Inhaltsübersicht

	Seite
0. Verzeichnis der verwendeten Symbole	6
1. Sinn und Zweck einer Systemtheorie der Druckverfahren	8
2. Aufgabenstellung	10
3. Systematik der Druckverfahren	12
3.1 Einleitung	12
3.2 Aktive und passive Träger	14
3.3 Die Grundbausteine im Aufbau eines Druckverfahrens	16
3.4 Das Kanalelement mit Trägerwechsel (KEW)	18
3.4.1 Vorbemerkung	18
3.4.2 Die dem KEW von der Seite her zugeführten Träger	19
3.4.3 Die Zahl der verschiedenen Typen von KEW	20
3.4.4 Verknüpfungsregeln	20
3.4.5 Ermittlung der sinnvollen Typen von KEW	24
3.4.6 Ermittlung der Häufigkeit der Trägerketten	28
3.4.7 Zusammenstellung aller sinnvollen Typen von KEW geordnet nach der Häufigkeit ihrer Trägerketten	30
3.5 Das KEW im informationsverarbeitenden System	33
3.5.1 Die Entwicklung neuer Systeme	34
3.5.2 Die Verbesserung gegebener Systeme	36
3.6 Der Grundaufbau der drei Hauptdruckverfahren	36
3.6.1 Aufzeichnen des Grundaufbaues der Verfahren	43
3.6.2 Vergleich des Grundaufbaues der drei Hauptdruckverfahren	45
4. Informationstheorie und Drucktechnik	47
4.1 Einige Begriffe der Informationstheorie	47
4.2 Die Information eines Bildes	51
4.2.1 Farbraum und Farbraumelement	51

4.2.2 Berechnung des Informationsgehaltes eines Bildes	54
4.2.3 Einrichtung zur Messung des Informationsgehaltes eines Bildes	64
4.2.4 Bemerkungen zum Unterschied zwischen dem Gehalt und dem Inhalt einer Information	66
4.3 Weitere informationstheoretische Begriffe	68
4.3.1 Definitionen; das Bergersche Diagramm	68
4.3.2 Bestimmung der neu eingeführten informationstheoretischen Größen im Bergerschen Diagramm	70
4.4 Definition einer Druckgüte q als Maß für die Druckqualität	87
4.4.1 Herleitung der Beziehung für die Druckgüte q	87
4.4.2 Die drucktechnische Bedeutung der Druckgüte q	93
4.4.3 Bemerkung zum Wirkungsbereich der Informationstheorie innerhalb der Drucktechnik	94
4.4.4 Diskussion der Gleichung für die Druckgüte q , Festlegung der Konstanten S_0	97
5. Zusammenfassung und Ausblick	109

0. Verzeichnis der verwendeten Symbole

A_{ij}	aktiver Informationsträger	
P_j	passiver Informationsträger	
T_j	Trägerkette	
Index i	= 1 (erster Grad), 2 (zweiter Grad)	
Index j	= E (Eingang), A (Ausgang)	
$p(u)$	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses u	
$p_u(v)$	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses v unter der Voraussetzung, daß das Ereignis u eingetreten ist	
$p(u,v)$	Wahrscheinlichkeit für das gemeinsame Eintreten der Ereignisse u und v	
u, v	= x_i oder y_j	
x_i	Farbraumelement i der Vorlage	
y_j	Farbraumelement j der Reproduktion	
rz	Rasterlinienzahl	
N	Zahl der Bildelemente auf einer Bildfläche	
zf	Zahl der Farbraumelemente auf einer Bildfläche	
m	Zahl der Farbraumelemente auf der Vorlage	
n	Zahl der Farbraumelemente auf der Reproduktion	
\bar{F}	Farbreiz im Mittelpunkt eines Farbraumelementes	
H	Informationsgehalt eines Bildelementes	bit/Bildelement
H_{\max}	Entscheidungsgehalt eines Bildelementes	bit/Bildelement
H_F	Informationsgehalt eines Bildes	bit
H_1	Informationsgehalt pro Einheitsfläche z.B.	bit/cm ²
F	Bildfläche	
K	Zahl aller Körperfarben	
KEW	Kanalelement mit Trägerwechsel	
$H_{\max K}$	der zu K gehörige Entscheidungsgehalt	bit/Körperfarbe

F_{\max}	Bildfläche, bei der $H_{\max K}$ gerade möglich wird	
$H_{\max g}$	größter Entscheidungsgehalt eines Bildelementes auf einer bestimmten Bildfläche bit/Bildelement	bit/Bildelement
$H(x)$	Informationsgehalt der Vorlage	bit/Bildelement
$H(y)$	Informationsgehalt der Reproduktion	bit/Bildelement
$H_y(x)$	Äquivokation	bit/Bildelement
$H_x(y)$	Irrelevanz	bit/Bildelement
R	Transinformationsgehalt	bit/Bildelement
$H(x; y)$	Informationsgehalt pro Bildelement, der durch Vorlage und Reproduktion zusammen hervorgerufen wird	bit/Bildelement
A_i	bedingte Häufigkeit des Farbraumelementes i der Vorlage	
A_j	bedingte Häufigkeit des Farbraumelementes j der Reproduktion	
ev	Exergie der Vorlage	
er	Exergie der Reproduktion	
I	Arbeiten und Wärmen	
ev_v	Exergie der idealen Volltonfläche als Vorlage	
er_v	Exergie der idealen Volltonfläche als Reproduktion	
Δer	Änderung der Exergie der Vorlage bei Auftreten mehrerer unterscheidbarer Farbzeize	
Δer_{rel}	relevanter Anteil von Δer	
Δer_{ir}	irrelevanter Anteil von Δer	
V	nichtarbeitsfähige Energien (Anergien)	
ΔW_z	gewollte Zunahme an arbeitsfähiger Energie	
ΔW_a	für ΔW_z erforderliche Energie	
W	unerwünschte Energie	
η_e	exergetischer Wirkungsgrad	
Δs	Entropieänderung	
q	Druckgüte	
ϵ	minimale Druckgüte	
S_0	Entropiemaß der idealen Volltonfläche	

1. Sinn und Zweck einer Systemtheorie der Druckverfahren

In der Drucktechnik gibt es heute mehrere Verfahren, die von der Vorlage zum fertigen Druck führen. Die Geschäftsleitung einer Druckerei muß entscheiden, welche dieser möglichen Verfahren sich für die Herstellung bestimmter Produkte am besten eignen, also am wirtschaftlichsten einsetzbar sind. Eine ähnliche Entscheidung hat der Maschinenhersteller zu fällen, der sein Lieferprogramm auf die zukünftigen Bedürfnisse des Marktes abstimmen muß. In beiden Fällen sind Entscheidungen zu treffen, die heute noch zum überwiegenden Teil nur auf Erfahrungsdaten beruhen. Noch existieren keinerlei Bewertungskriterien, die einen Vergleich beliebiger Druckverfahren ermöglichen und damit als klare, objektive Entscheidungshilfen das Risiko einer Fehlentscheidung erheblich vermindern würden. Fehlentscheidungen führen zu Fehlinvestitionen in Druckereien und Maschinenfabriken, die bei der Größe heutiger Produktionsanlage erhebliche finanzielle Verluste zur Folge haben können.

Vor der Aufstellung von Bewertungskriterien muß bekannt sein, was bewertet werden soll. Bei den Druckverfahren interessiert vor allem die erreichbare Druckqualität, die dabei maximal mögliche Produktionsleistung sowie der technische Aufwand zur Verwirklichung bestimmter Werte dieser beiden Kenngrößen.

Allgemein gültige Bewertungsmethoden erfordern auch eine allgemeine Betrachtungsweise. Druckverfahren dienen der Verbreitung von Informationen. Es liegt daher nahe, das Übertragungsverhalten der Verfahren mit Hilfe der Informationstheorie zu beschreiben und dabei gleichzeitig den Versuch zu unternehmen, mit Hilfe dieser Theorie eine Druckgüte als Maß für die Druckqualität zu definieren. Es gibt zwar eine Reihe von Qualitätsmerkmalen zur Beurteilung eines Druckes [1], die teilweise auch mit Meßgeräten erfaßt werden können, die Druckqualität als integrales Qualitätsmaß kann jedoch heute für die überwiegende Zahl der Bildmotive nur durch den Drucker beurteilt werden, der ein subjektives Werturteil aufgrund seiner Erfahrung fällt. Das Fehlen eines objektiven, meßbaren Gütemaßes führt häufig zu Meinungsverschiedenheiten bei der Beurteilung von Drucken, insbesondere bei der Abnahme der Druckprodukte durch den Kunden. Eine meßbare Druckgüte als Maß für die Druckqualität würde eine objektive Qualitätskontrolle während des Druckprozesses unter Einhaltung vorgegebener Toleranzen ermöglichen. Mit der Meßbarkeit der Druckgüte wäre auch der Weg frei für eine Qualitätsregelung drucktechnischer Prozesse sowie für das Simulieren dieser Prozesse mit Hilfe von Computern. Letzteres wäre für die Optimierung der Verfahren von Bedeutung.

Es ist heute möglich, die Druckqualität von Voll- oder Halbtonflächen mit Hilfe von Meßgeräten zu beurteilen. Eines dieser Geräte ist der von M. Brune und H. Diehl entwickelte Varianzmesser [2], der die Schwärzung bzw. eine Farbdichte und die Gleichmäßigkeit von Volltonflächen erfaßt. Dabei wird eine Meßfläche punktwise abgetastet und der mittlere Remissionsgrad als Maß für die Schwärzung sowie die Standardabweichung des Remissionsgrades als Maß für die Gleichmäßigkeit der Volltonfläche gemessen. T. Makkonen und L. Nordmann entwickelten ein Gerät [3], mit dessen Hilfe eine objektive Beurteilung der Druckqualität von Halbtonflächen möglich ist. J. R. Parker [4]

gibt eine Methode an, nach der die Druckqualität einer Halbtonfläche aus der Beurteilung der Schwärzung bzw. Farbdichte und der Gleichmäßigkeit einer Volltonfläche vorausgesagt werden kann. Ein objektives Verfahren zur Messung der Druckgüte der Reproduktion eines Bildes mit mehreren unterscheidbaren Farbreizen ist noch nicht bekannt.

Eine allgemeine Betrachtungsweise, wie sie sich insbesondere durch die Einführung der Informationstheorie in die Drucktechnik ergibt, erweitert auch den Inhalt der Begriffe „Drucktechnik“ und „Druckverfahren“. Losgelöst von der einengenden Vorsilbe „Druck-“ beschreiben sie im folgenden Techniken bzw. Verfahren, die ausgehend von Vorlagen zur reproduzierbaren Herstellung mehrfarbiger Duplikate auf materiellen Informationsträgern dienen, wobei die Speicherkapazität dieser Träger praktisch unbegrenzt lange ohne Zufuhr von Energie erhalten bleiben soll. Dieser Nachsatz dient einer Abgrenzung der Drucktechnik und schließt beispielsweise die Erzeugung von Bildern auf Leuchtschirmröhren als Endziel eines Druckverfahrens aus.

Diese Abgrenzung der Begriffe erfolgt unter der Annahme, daß der letzte Übertragungskanal, der den Weg des Druckproduktes zum Endverbraucher darstellt, ohne Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems sei. Es ist jedoch denkbar, daß die Eigenschaften dieses letzten Übertragungskanales die zukünftige Entwicklung bestimmter Druckprodukte entscheidend beeinflussen. Dies gilt vor allem für die Zeitung, die aus Gründen der Aktualität bestrebt sein muß, die Zeit für den Transport des Druckproduktes vom Produktionsort zum Leser so kurz wie möglich zu halten. Beim Vergleich der verschiedenen Kommunikationsmittel, deren sich der Empfänger von Nachrichten bedienen kann, muß natürlich im Bereich der Drucktechnik auch der Transport der Druckprodukte zum Nachrichtempfänger in die Betrachtung einbezogen werden. Die obige Abgrenzung der Drucktechnik steht derartigen Untersuchungen nicht im Wege, da sie nur den Inhalt der Begriffe „Drucktechnik“ und „Druckverfahren“ festlegen sollte.

Druckverfahren lassen sich in eine Kette von Grundeinheiten zerlegen, welche die Stellen möglicher Informationsverluste symbolisieren. Gleichzeitig wird die Kompliziertheit des Grundaufbaues eines Druckverfahrens sichtbar. Aus der Tatsache, daß die Information in der Drucktechnik als Transportmittel häufig eine Verbindung mehrerer Träger zu einer Trägerkette verwendet, ergeben sich eine Reihe unterschiedlicher Typen der Grundeinheiten eines Druckverfahrens. Die Untersuchung der Gestalt dieser Bausteine sowie ihrer Ketten führt zu einer Systematik der Druckverfahren.

Systematik und Informationstheorie ergänzen sich gegenseitig, wobei die Systematik durch die Anwendung der Informationstheorie erst ihr volles Gewicht erhält. Während die Systematik die Stellen möglicher Informationsverluste offenlegt, ermöglicht die Informationstheorie eine Aussage über die Auswirkung dieser Verluste auf die Druckqualität. Diese grundlegende Betrachtungsweise führt zu einer Systemtheorie der Druckverfahren, zu der diese Arbeit einen Beitrag leisten möchte.

Bei der Analyse der Druckverfahren stellt sich zwangsläufig auch die Frage nach der Sinnfälligkeit der einzelnen Arbeitsgänge im Hinblick auf eine Verbesserung der Ver-

fahren. Verbessern bedeutet gleichzeitig ein Aufsuchen neuer Lösungen. Aufbauend auf die Systemtheorie der Druckverfahren lassen sich Methoden ausarbeiten, die in systematischer und damit rationeller Weise einen Blick in die mutmaßliche Zukunft der Drucktechnik ermöglichen. Dies erscheint wichtig im Hinblick auf die auch in der graphischen Industrie immer schneller verlaufende technische Entwicklung.

Es ist klar, daß die Systematik und die Informationstheorie allein noch keine vollständige Bewertung drucktechnischer Systeme ermöglichen. Hier fehlt noch die Beurteilung der technischen Gestalt sowie die Wirtschaftlichkeitsrechnung. Diese beiden Gesichtspunkte einer Bewertung gehören in das Gebiet der Höheren Konstruktionslehre bzw. der Betriebswirtschaftslehre. Sie werden daher aus der vorliegenden Betrachtung ausgeschlossen. Abschließend sei noch vermerkt, daß wesentliche Teile der Kapitel 1 und 3 sowie der Abschnitte 4.1 und 4.2 dieser Arbeit bereits veröffentlicht wurden [5].

2. Aufgabenstellung

Im vorliegenden Beitrag zur Systemtheorie der Druckverfahren wird zunächst eine Systematik der Druckverfahren ausgearbeitet und anschließend die Informationstheorie in einem ersten Schritt in die Drucktechnik eingeführt.

Im einzelnen ergeben sich folgende Probleme:

1. Systematik der Druckverfahren

Hier wird der allgemeine Grundaufbau der Verfahren untersucht. Hinweise auf Möglichkeiten zur Verbesserung und Neuentwicklung von Verfahren werden gegeben.

2. Informationstheorie und Drucktechnik

Druckverfahren dienen der Verbreitung von Informationen. Sie können daher als Übertragungskanäle im Sinne der Informationstheorie angesehen werden. Bild 1 zeigt einen derartigen Übertragungskanal, wobei das Druckverfahren symbolisch als Kasten dargestellt wird.

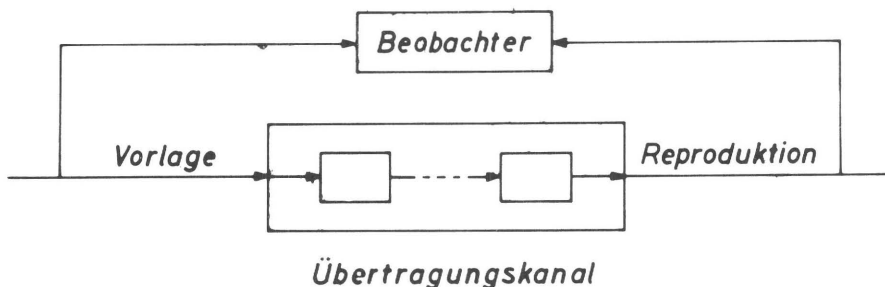


Bild 1: Das Druckverfahren, ein Übertragungskanal

Am Ein- und Ausgang des Übertragungskanal befindet sich die Information gespeichert in der Vorlage, in einem Bezugsbild oder im Original selbst bzw. in der Reproduktion. Der Mensch tritt als Beobachter hinzu und betrachtet Vorlage und Reproduktion. Er vergleicht beide miteinander, um sich ein Urteil über die Druckqualität zu bilden. Schließlich versucht er, aus dem Übertragungsverhalten des gesamten Verfahrens oder der Teilsysteme Rückschlüsse auf das Druckergebnis zu ziehen. Der Beobachter möchte wissen, wie die Betriebsbedingungen die Druckqualität beeinflussen.

Bei der Einführung der Informationstheorie in die Drucktechnik entstehen somit im wesentlichen drei Problemkreise:

1. Beschreibung und Messung der Informationsmenge, die der Mensch, im speziellen Fall der Drucker, beim Betrachten eines Bildes aufnimmt.
2. Informationstheoretische Beschreibung und meßtechnische Erfassung des Vergleichs zweier Bilder zur Beurteilung der Druckqualität. Dabei läßt sich eine Druckgüte als Maß für die Druckqualität definieren.
3. Untersuchung des Einflusses des Übertragungsverhaltens des gesamten Druckverfahrens oder seiner Teilsysteme auf das Druckergebnis. Hier interessiert, wie sich die Betriebsbedingungen oder deren Änderungen auf die Druckqualität auswirken (z.B. Änderung des Verlaufs der Schwärzungskurve eines Filmes, der Ätzbadtemperatur oder der Druckgeschwindigkeit).

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Behandlung der beiden ersten Problemkreise. Das Kapitel Informationstheorie und Drucktechnik zerfällt daher in zwei Teile.

Der erste Abschnitt befaßt sich mit der Information eines Bildes. Eine Einrichtung zur Messung des mittleren Informationsgehaltes eines Bildes wird beschrieben. Außerdem wird die wichtige Frage erörtert, ob die Einführung der Informationstheorie in die Drucktechnik überhaupt sinnvoll ist, vor allem wenn es darum geht, ein dem Empfinden des Druckers angepaßtes Gütemaß für die Druckqualität zu erhalten.

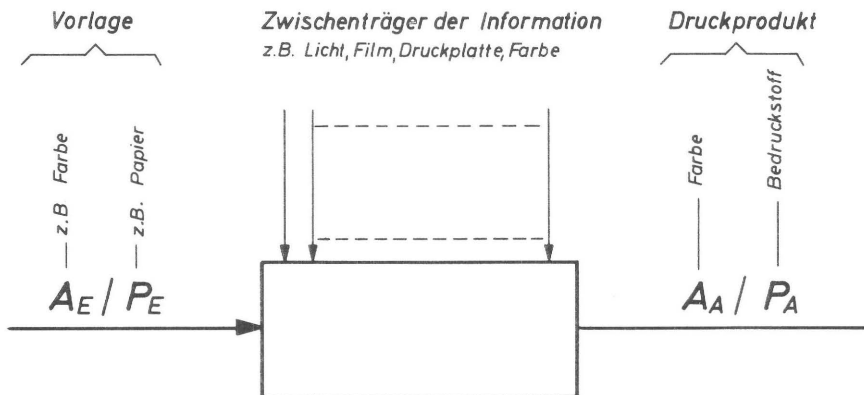
Der zweite Teil dieses Kapitels bildet den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit im Hinblick auf ihre praktische Bedeutung. Dieser Abschnitt befaßt sich mit dem Thema Informationstheorie und Druckqualität. Nach der drucktechnischen Deutung verschiedener informationstheoretischer Begriffe wird eine Druckgüte als Maß für die Druckqualität mit Hilfe der Thermodynamik hergeleitet. Schließlich folgt eine Diskussion des neu gefundenen Gütebegriffes.

Da die Erkenntnisse der Informationstheorie einerseits noch nicht Allgemeingut der Techniker geworden sind, andererseits jedoch in Zukunft immer stärker in der Technik Anwendung finden werden, beginnen die beiden oben genannten Abschnitte des Kapitels Informationstheorie und Drucktechnik jeweils mit der Einführung und Erläuterung der für das Verständnis nötigen Begriffe der Informationstheorie.

3. Systematik der Druckverfahren

3.1 Einleitung

Ein Druckverfahren dient der Verbreitung von Informationen, die dabei im Rahmen eines Prozesses weitergeleitet und verarbeitet werden. Bild 2 zeigt in symbolischer Darstellung ein Druckverfahren als informationsverarbeitendes System.*



A: aktiver Informationsträger (z.B. aufgedruckte Farbe) Index E: Eingang

P: passiver " (z.B. Papier) Index A: Ausgang

Bild 2: Das Druckverfahren, ein informationsverarbeitendes System

* Man spricht in der Nachrichtentechnik von Informationsverarbeitung, wenn aus mehreren Informationen nach einem Verarbeitungsprozeß eine einzige Information entsteht. Soll beispielsweise in einem Rechner die Multiplikation 2×4 ausgeführt werden, so sind die Zahlen 2 und 4 sowie die Anweisung „multipliziere“ Eingangsinformationen, aus denen nach dem Rechenprozeß die Information 8 entsteht. Man sieht hierbei dem Ergebnis nicht an, aus welchen Eingangsinformationen es entstanden ist.

Bei der Informationsübertragung ist jeder Information am Eingang des Übertragungskanalns nur eine einzige Information am Ausgang zugeordnet.

In Kapitel 4 dieser Arbeit wird die Informationstheorie in einem ersten Schritt in die Drucktechnik eingeführt. Dabei wird die Vorlage als die einzige Information betrachtet, die dem drucktechnischen System eingegeben wird, um die Reproduktion herzustellen. Bei dieser Betrachtungsweise müßte man somit von Informationsübertragung und nicht von Informationsverarbeitung sprechen. Tatsächlich werden dem drucktechnischen System mehr als eine Information zugeführt. Neben der Vorlage als Informationsträger gelangen beispielsweise durch den Retuscheur zusätzliche Informationen in das System. Somit darf man von einer Informationsverarbeitung sprechen.

Die Information, eine immaterielle Größe, verbindet sich zum Transport mit Informationsträgern. Am Eingang des dargestellten Druckverfahrens befindet sich die Vorlage mit Farbe und Papier als Informationsträger. Diese geben die Information bei der Verarbeitung im System an verschiedene Zwischenträger der Information (z.B. Licht, Film, Druckplatte, Farbe) weiter. Am Ausgang des Druckverfahrens erscheint schließlich das Druckprodukt, bei dem Farbe und Bedruckstoff als Informationsträger dienen.

Mit der Verarbeitung der Informationsträger in den Systemen erfolgt gleichzeitig auch die Verarbeitung der Information. Es ist zweckmäßig, die einzelnen Informationsträger auf ihrem Weg durch das gesamte System zu verfolgen. Dabei werden diejenigen Bereiche sichtbar, in denen die Träger physikalischen und chemischen Prozessen unterworfen oder durch neue Träger ersetzt werden, in denen also Informationsverluste auftreten können. Die Darstellungsweise nach Bild 2 ist für diese Aufgabe zu grob. Aus diesem Grunde wird ein Druckverfahren in eine Kette von Grundbausteinen zerlegt, welche die Stellen möglicher Informationsverluste symbolisch darstellen. Prozesse, bei denen im allgemeinen keine Informationsverluste auftreten, wie z.B. Falz- oder Heftvorgänge, werden nicht in die vorliegende Untersuchung einbezogen.

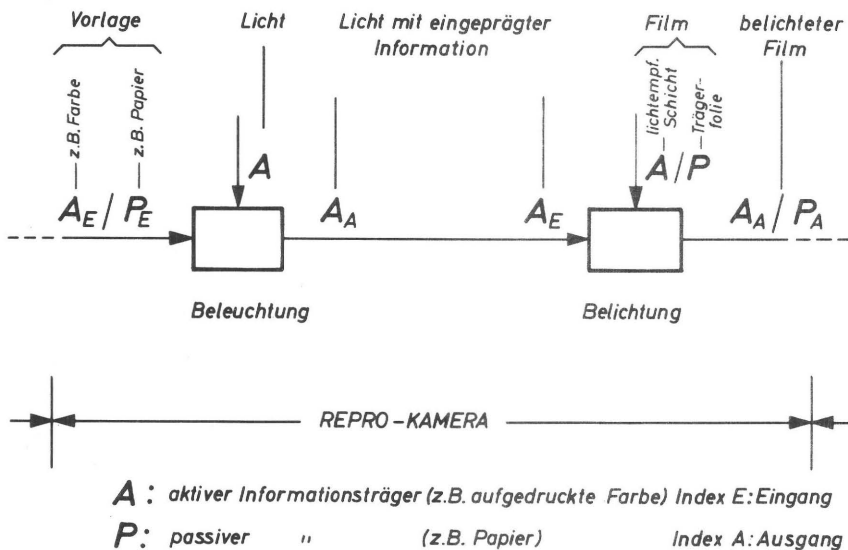


Bild 3: Die Reprokamera als Teil eines informationsverarbeitenden Systems

Bild 3 zeigt die Reprokamera als Teil eines Druckverfahrens. Die beiden Kästchen symbolisieren die Beleuchtung und die Belichtung als Stellen möglicher Informationsverluste. Die an die Vorlage gebundene Information geht bei der Beleuchtung (1. Kästchen) an das Licht über. Dieses von der Vorlage reflektierte Licht gelangt mit seiner eingepprägten Information zum Film. Dieser wird belichtet und erscheint als neuer Informationsträger am Ausgang des zweiten Kästchens. Im Gegensatz zur elektrischen Nachrichtentechnik werden in der Drucktechnik häufig mehrere Träger zu einer Trägerkette verbunden, z.B. Farbe auf Bedruckstoff, lichtempfindliche Schicht auf Trägerfolie usw. Manchmal besteht die Trägerkette nur aus einem einzigen Träger, z.B. Licht. Der Aufbau eines Druckverfahrens als informationsverarbeitendes System hängt nun im wesentlichen von der Gestalt seiner Trägerketten ab. Je nach Aufbau der Trägerketten existieren verschiedene Typen der Grundbausteine (vgl. Bild 3: Der Aufbau der Trägerketten am Ein- und Ausgang der beiden Grundbausteine ist unterschiedlich; es handelt sich demnach auch um zwei verschiedene Typen von Grundbausteinen).

Die erste Aufgabe dieser Systematik besteht darin, sämtliche praktisch ausführbare Typen dieser Grundbausteine zu katalogisieren. Danach wird geprüft, welche Typen zu besonders „kurzen“ Verfahren führen. Hierbei wird die Fähigkeit der einzelnen Typen der Grundbausteine beurteilt, die Information mehr oder weniger direkt dem Ausgang des Druckverfahrens zuzuleiten.

Eine bestimmte Type der Grundbausteine verkörpert immer eine Vielzahl technischer Realitäten. Die Darstellung der Druckverfahren als eine Kette von Grundeinheiten ist somit nicht mehr mit einer speziellen technischen Gestalt unmittelbar verknüpft. Dadurch treten Gemeinsamkeiten im Aufbau anscheinend verschiedener Verfahren klar hervor. Hierbei stellt sich zwangsläufig die Frage nach der unbedingten Notwendigkeit der einzelnen Grundbausteine. Losgelöst von der technischen Gestalt lassen sich neue, kürzere Ketten konstruieren, die anschließend auf ihre technische Realisierbarkeit hin untersucht werden müssen. Eine systematische Verbesserung und Neuentwicklung von Druckverfahren wird damit möglich. Dies kann beispielsweise mit Hilfe der von Zwicky angegebenen Methode des morphologischen Schemas [6] geschehen.

3.2 Aktive und passive Träger

Eine Trägerkette besteht aus einem oder mehreren Informationsträgern, die sowohl aktiv (A) als auch passiv (P) sein können (vgl. Bild 3).

Definition:

(Informations-)Träger sind aktiv, wenn ihr physikalischer und bzw. oder chemischer Zustand vom Informationsgehalt (Erläuterung informationstheoretischer Begriffe s. Kap. 4 Informationstheorie und Drucktechnik) beeinflusst wird.

Aktive Informationsträger sind z.B. die Farbe auf einer Vorlage oder Reproduktion, eine Druckform, ein Lichtstrahl, ein elektrisches Spannungs- oder Stromsignal.

(Informations-)Träger sind passiv, wenn ihr physikalischer und bzw. chemischer Zustand vom Informationsgehalt nicht beeinflusst wird.

Passive Informationsträger können sein z.B. der Bedruckstoff, die Trägerfolie eines Filmes oder Pigmentpapiere, eine Montagefolie, der Plattenzylinder, die Druckmaschine usw.

Da innerhalb einer Trägerkette mehr als ein Vertreter dieser beiden Trägergruppen existieren kann (bei aktiven Trägern z.B. Druckfarbe auf Druckform, bei passiven Trägern z.B. Grundblech einer Offset- oder Wickelplatte auf dem Plattenzylinder), muß eine Kennzeichnung eingeführt werden.

Innerhalb der Gruppe der aktiven Träger werden die zeitlich zuletzt hinzugekommenen als solche ersten Grades, die vorangegangenen als solche zweiten Grades, ..., m-ten Grades bezeichnet.

In entsprechender Weise unterscheiden sich auch die passiven Träger. Somit werden die zeitlich zuletzt in die Trägerkette aufgenommenen passiven Träger als solche ersten Grades, die vorangegangenen als solche zweiten Grades, ..., n-ten Grades bezeichnet.

Die aktiven und passiven Träger werden in einer Trägerkette durch einen Querstrich voneinander getrennt. Damit erhält eine Trägerkette im allgemeinen folgenden Aufbau:

$$A_1, A_2, \dots, A_m / P_1, \dots, P_n$$

Entsprechend dem allgemeinen Aufbau einer Trägerkette sind theoretisch unendlich viele verschiedene Typen von Trägerketten und damit auch von Grundbausteinen möglich. Die Zahl der Träger innerhalb einer Trägerkette läßt sich jedoch mit Hilfe einer einfachen Überlegung einschränken, ohne dabei die Zahl der für eine technische Realisierung sinnvollen Typen der Grundbausteine zu beschneiden. Die Begrenzung der Anzahl der Träger innerhalb einer Trägerkette läßt sich an einem Beispiel erläutern:

Es wäre für die Weiterleitung der Information sinnlos, d.h. umständlich, eine Druckform zunächst mit einem Zwischenmedium einzufärben, auf dem dann in einem zweiten Einfärbevorgang die eigentliche Druckfarbe zu liegen käme. Die Kette der Grundbausteine eines Verfahrens wird dadurch unnötig verlängert.

Das Beispiel zeigt, daß der aktive Träger zweiten Grades A_2 , hier die eingefärbte Druckform, an der Übernahme der Information durch die zweite Druckfarbe nicht mehr unmittelbar beteiligt ist. Daraus folgt, daß der aktive Träger zweiten Grades seiner Natur nach bereits ein passiver Träger ist. In der Mehrzahl der Fälle braucht nämlich sein

physikalischer und bzw. oder chemischer Zustand nach der Weitergabe der Information nicht mehr notwendigerweise vom Informationsgehalt geprägt zu sein, sobald der aktive Träger ersten Grades die Information übernommen hat.

Diese Überlegungen führen zu der Erkenntnis, daß zwei aktive Träger vollauf genügen, um die Weiterleitung der Information sicherzustellen. Ein zusätzlicher aktiver Träger dritten Grades würde den Aufbau des informationsverarbeitenden Systems nur unnötig kompliziert machen. Aus diesem Grund wird die Zahl der aktiven Träger innerhalb einer Trägerkette auf zwei beschränkt.

Bei den passiven Trägern interessieren nur diejenigen, die für die Speicherung und Weiterleitung der Information unmittelbar erforderlich sind. Dies sind die passiven Träger ersten Grades (z.B. Grundblech einer Offset- oder Wickelplatte, Bedruckstoff, Trägerfolie eines Filmes). Alle übrigen passiven Träger werden daher aus den folgenden Betrachtungen ausgeklammert.

Die in dieser Systematik der Druckverfahren untersuchten Trägerketten besitzen somit die folgende allgemeine Gestalt:

$$A_1, A_2/P$$

Der Index von P kann wegfallen, da nur passive Träger ersten Grades betrachtet werden.

3.3 Die Grundbausteine im Aufbau eines Druckverfahrens

Bei der Betrachtung eines Druckverfahrens als informationsverarbeitendes System lassen sich grundsätzlich zwei verschiedene Arten von Grundbausteinen unterscheiden.

1. Das Kanalelement mit Trägerwechsel, kurz KEW genannt.

Eine allgemeine Darstellung eines KEW zeigt Bild 4.

Die Indices E und A kennzeichnen den Ein- und Ausgang eines Grundbausteines.

Kennzeichen eines KEW: Die Träger bzw. deren Grad sind innerhalb einer Trägerkette am Ausgang eines KEW nicht dieselben wie am Eingang.

Beispiel: Darstellung einer Reprokamera als Teil eines informationsverarbeitenden Systems in Bild 3. Sowohl bei der Beleuchtung als auch bei der Belichtung liegen am Ein- und Ausgang der beiden Kanalelemente unterschiedliche Trägerketten vor (hier sogar unterschiedliche Typen der Trägerketten).

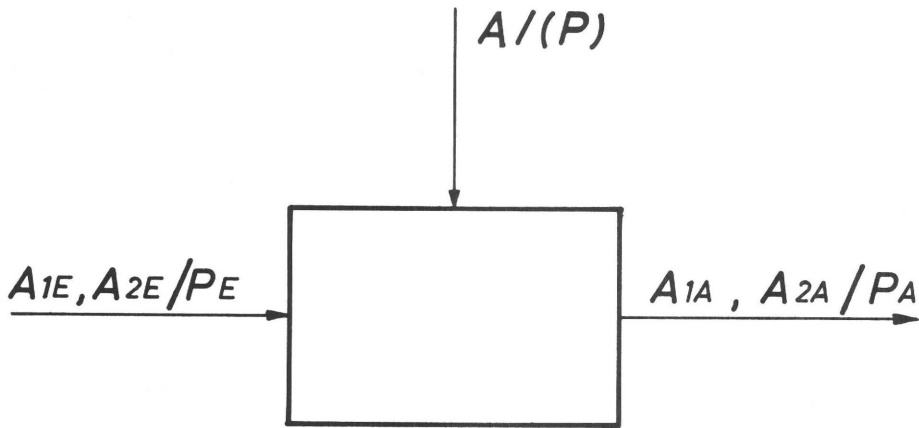


Bild 4: Das Kanalelement mit Trägerwechsel

2. Das Kanalelement ohne Trägerwechsel

Die Verbindung zweier KEW wird durch das Kanalelement ohne Trägerwechsel dargestellt. Es ist dadurch gekennzeichnet, daß die Träger und ihr Grad am Eingang und am Ausgang dieselben, d.h. identisch sind. Ein Verarbeitungsprozeß ist dabei nicht ausgeschlossen, sondern in vielen Fällen die Regel, wie das folgende Beispiel zeigt. Nach der Aufnahme in der Reprokamera (vgl. Bild 3) muß der Film entwickelt werden. Bei diesem Prozeß wird der Aufbau der Trägerkette A_1/P (belichteter Film) nicht verändert. Sie erscheint als A_{1E}/P_E am Eingang des nächsten KEW wieder. Die Trägerketten am Ein- und Ausgang des Entwicklungsvorganges sind somit dieselben (d.h. dieselbe lichtempfindliche Schicht A als aktiver, dieselbe Trägerfolie als passiver Informationsträger).

Zwischen zwei KEW können auch mehrere in Serie liegende Kanalelemente ohne Trägerwechsel existieren.

Die allgemeine Darstellung eines Kanalelements ohne Trägerwechsel zeigt Bild 5. T_E und T_A bezeichnen die Trägerketten am Ein- und Ausgang.



Bild 5: Das Kanalelement ohne Trägerwechsel

Wird die Information von einem KEW zum anderen weitergeleitet, ohne daß ein Verarbeitungsprozeß erfolgt, so wird dies durch eine einfache Verbindungslinie zwischen den KEW angedeutet (vgl. Bild 3).

Das Vorhandensein eines verarbeitenden Kanalelements ohne Trägerwechsel ist von der jeweiligen technischen Gestalt der benachbarten KEW abhängig (im obigen Beispiel: nach dem Belichten des Filmes muß entwickelt werden. Ohne den Belichtungsvorgang wäre der Entwicklungsprozeß nicht sinnvoll). Damit wird der Grundaufbau eines Druckverfahrens in erster Linie von den KEW bestimmt. Die enge Koppelung der technischen Gestalt der Kanalelemente ohne Trägerwechsel mit derjenigen der KEW führt dazu, daß praktisch nur die Kanalelemente mit Trägerwechsel die Möglichkeit bieten, den Aufbau der Systeme wesentlich zu verändern. Die KEW bestimmen sozusagen das charakteristische Aussehen eines Druckverfahrens. Aus diesem Grunde befaßt sich die Systematik der Druckverfahren hauptsächlich mit der Untersuchung des Aufbaues der KEW und ihrer Verbindungsmöglichkeiten zu drucktechnischen Systemen.

3.4 Das Kanalelement mit Trägerwechsel (KEW)

3.4.1 Vorbemerkung

Beim KEW (vgl. Bild 4) sind im Gegensatz zum Kanalelement ohne Trägerwechsel die Trägerketten am Ein- und Ausgang unterschiedlich. Hierbei können einzelne Träger am Eingang des KEW identisch am Ausgang wieder erscheinen, z.B. $A_{2A} \equiv A_{1E}$.

Der Begriff „identisch“ hat hier die folgende Bedeutung: Ein Informationsträger am Eingang eines Kanalelements mit oder ohne Trägerwechsel erscheint dann am Ausgang identisch wieder (ist dann derselbe), wenn er auf seinem Weg durch den Grundbaustein nicht durch einen neu in das System eingeführten Informationsträger ersetzt wird. Diese Definition des Begriffes „identisch“ läßt Veränderungen des physikalischen und chemischen Zustandes der Träger beim Durchlaufen der Grundeinheiten zu. Diese Veränderungen sind letztlich auch die Ursache für die Informationsverluste.

Als Beispiel sei wieder auf das Entwickeln eines belichteten Filmes zurückgegriffen. Die Träger innerhalb der Kette A/P (belichteter Film vgl. Bild 3) erscheinen nach dem Entwicklungsprozeß, der durch ein Kanalelement ohne Trägerwechsel dargestellt werden kann, „identisch“ wieder, d.h. sie werden während des Bearbeitungsprozesses nicht durch neu in das System eingeführte Träger ersetzt. Da jedoch die belichtete Filmschicht (A) entwickelt wird, treten physikalische und chemische Veränderungen beim Durchlaufen des Kanalelementes auf.

Beim Eintritt in ein KEW ändert sich der Aufbau der Trägerkette. Es wird nun festgelegt, daß in einem KEW nur eine einzige Veränderung des Aufbaues der in das KEW eintretenden Trägerkette erfolgen darf. Auf diese Weise stehen die Träger auf der Ausgangsseite eines KEW mit denjenigen am Eingang in einem unmittelbaren zeitlich kausalen Zusammenhang.

Dies bedeutet, daß die Trägerkette am Ausgang eines KEW maximal nur eine Nahtstelle aufweisen darf, die eben erst im KEW durch die Verknüpfung zweier Trägergruppen entstanden ist. Tritt keine derartige Nahtstelle auf, so muß der aktive Träger ersten Grades am Ausgang des KEW die Information direkt vom aktiven Träger ersten Grades am Eingang erhalten haben (Beispiel: Darstellung des Beleuchtungs- und Belichtungsprozesses in Bild 3; die Information geht von der Vorlage direkt an das Licht und von diesem direkt an den Film über).

Durch die obige Abteilmvorschrift für die KEW wird erreicht, daß jeweils nur ein einziger informationsverarbeitender Prozeß durch ein KEW symbolisch dargestellt wird. Damit ergibt sich überhaupt erst die Möglichkeit, die Kompliziertheit des Aufbaus verschiedener Druckverfahren miteinander zu vergleichen.

3.4.2 Die dem KEW von der Seite her zugeführten Träger

Im KEW wird der Aufbau der einzelnen Trägerketten verändert, wobei u.U. neue Informationsträger in das System eintreten. Hierzu müssen sie dem KEW von der Seite her zugeführt werden (vgl. Bild 4). Beim Einbau in eine Trägerkette wandeln sie sich zu aktiven oder passiven Trägern um. Da ihr Verwendungszweck von vorneherein bekannt ist, können sie bereits vor ihrem Eintritt in das KEW als aktive (A) bzw. passive Träger (P) bezeichnet werden.

Neu hinzugekommene aktive Träger werden im KEW mit der Information verknüpft. Sie erscheinen daher am Ausgang des KEW immer als aktive Träger ersten Grades.

Da die Trägerkette am Ausgang des KEW vereinbarungsgemäß nur einen passiven Träger besitzen soll, kann auch nur ein Träger dieser Gattung in das KEW von der Seite her eintreten.

Somit können einem KEW maximal ein aktiver und ein passiver Träger entweder einzeln oder als Kombination A/P zugeführt werden (s. Bild 4).

3.4.3 Die Zahl der verschiedenen Typen der KEW

Werden verschiedene Typen von Trägerketten über ein KEW miteinander verbunden, so entstehen ebenfalls unterschiedliche Typen der KEW. Da einzelne Träger einer Trägerkette am Ein- und Ausgang identisch sein können, ist die Zahl der verschiedenen Typen von KEW größer als die Anzahl der Trägerketten unterschiedlichen Aufbaus.

Beschränkt man die Zahl der aktiven Träger auf zwei und diejenige der passiven auf eins, wie dies in Bild 4 dargestellt wird, so ergeben sich insgesamt 91 verschiedene Typen von KEW. In dieser Zahl sind diejenigen Fälle eingeschlossen, bei denen einzelne Träger oder Trägergruppen innerhalb einer Trägerkette am Ein- und Ausgang identisch sind.

Im einzelnen ergeben sich $2^3 - 1 = 7$ unterschiedliche Trägerketten am Ein- und Ausgang eines KEW ohne Berücksichtigung etwaiger Identitäten. Bei der Kombination dieser 7 Trägerketten zu KEW entstehen $7 \times 7 = 49$ unterschiedliche Typen von KEW. Hinzu kommen noch die KEW mit identischen Trägern am Ein- und Ausgang. Dies sind nochmals $49 - 7 = 42$ Typen von KEW. Abzuziehen sind nämlich die sieben Fälle, bei denen die Trägerketten am Ein- und Ausgang der Grundbausteine identisch sind. Es handelt sich hier definitionsgemäß um Kanalelemente ohne Trägerwechsel und nicht um solche mit Trägerwechsel.

Insgesamt entstehen somit $49 + 42 = 91$ verschiedene Typen von KEW.

Nun lassen sich nicht alle 91 theoretisch denkbaren Typen von KEW praktisch verwirklichen. Außerdem gibt es KEW, die aufgrund ihres Aufbaues zu komplizierten Verfahren führen. Es existieren bestimmte Verknüpfungsregeln, die eingehalten werden müssen, damit die Verbindung zweier Trägerketten zu einer sinnvollen, d.h. zu einer realisierbaren und im Hinblick auf die Weiterleitung der Information unkomplizierten Type eines KEW führt. Es wird sich im folgenden zeigen, daß sich die 91 theoretisch denkbaren Typen von KEW mit Hilfe der Verknüpfungsregeln auf 28 sinnvolle reduzieren lassen.

3.4.4 Verknüpfungsregeln

Diese Regeln sind teilweise bereits in den vorhergehenden Abschnitten enthalten. Sie werden hier zusammengefaßt und ergänzt.

1. Die Trägerkette am Ausgang eines KEW darf maximal nur eine Nahtstelle aufweisen, die eben erst im KEW durch Verknüpfung zweier Trägergruppen entstanden ist. Tritt keine derartige Nahtstelle auf, so muß der aktive Träger ersten Grades am Ausgang des KEW die Information direkt vom aktiven Träger ersten Grades am Eingang erhalten haben (vgl. Abschnitt 3.4.1).

2. Die Träger bzw. deren Grad sind innerhalb einer Trägerkette am Ausgang eines KEW nicht dieselben wie am Eingang. Dies ist das Kennzeichen eines KEW. Im anderen Fall liegt ein Kanalelement ohne Trägerwechsel vor (vgl. Abschnitt 3.3).
3. Trägerketten, die keine aktiven Träger ersten Grades enthalten, sind definitionsgemäß (vgl. Abschnitt 3.2) nicht realisierbar.
4. Bei der Einführung neuer aktiver Träger in das informationsverarbeitende System werden diese im KEW mit der Information verknüpft. Sie erscheinen daher am Ausgang eines KEW immer als aktive Träger ersten Grades und niemals als solche zweiten Grades (vgl. Abschnitt 3.4.2).
5. Wird ein passiver Träger einem KEW alleine von der Seite her zugeführt, so müssen die aktiven Träger in der Trägerkette am Ausgang mit den zugehörigen in der Trägerkette am Eingang des KEW identisch sein.

Diese Vorschrift verhindert, daß in diesem Fall mehr als ein einziger Teilprozeß durch ein KEW dargestellt wird.

Sind die Träger innerhalb einer Trägerkette eines KEW alle, gruppenweise oder einzeln mit denjenigen der Trägerkette auf der Gegenseite identisch, so ergeben sich weitere Verknüpfungsregeln. Man findet sie, indem man die verschiedenen Verbindungsmöglichkeiten der identischen Träger am Ein- und Ausgang untersucht.

Um die im folgenden gebräuchliche Schreibweise zu verdeutlichen, ist in Bild 6 ein KEW beispielhaft dargestellt, in dessen Trägerketten am Ein- und Ausgang die aktiven Träger identisch sind.

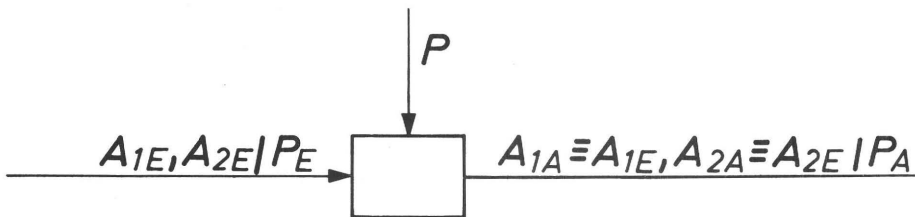


Bild 6: KEW, dessen aktive Träger am Ein- und Ausgang identisch sind

$A_{1A} \equiv A_{1E}$ bedeutet also: Die aktiven Träger ersten Grades am Ein- und Ausgang des KEW sind identisch. Das entsprechende gilt für die Kombination $A_{2A} \equiv A_{2E}$.

Die Kennzeichnung der Identität der Träger wurde in Bild 6 auf der Ausgangsseite des KEW vorgenommen. Eine derartige Markierung identischer Träger ist jedoch auch am Eingang des KEW oder auf beiden Seiten gleichzeitig möglich. Im ersten Falle hätte die Trägerkette am Eingang des KEW nach Bild 6 die Form $A_{1E} \equiv A_{1A}$, $A_{2E} \equiv A_{2A}/P_A$, während die Trägerkette am Ausgang die einfache Form A_{1A} , A_{2A}/P_A annehmen würde. Es ist prinzipiell gleichgültig, welche der drei Bezeichnungsarten verwendet wird.

Die insgesamt 42 theoretisch denkbaren Typen von KEW, bei denen Träger am Ein- und Ausgang identisch auftreten, entstehen durch einfache Kombination von Trägerketten, die maximal zwei aktive und einen passiven Träger enthalten. Sämtliche Identitäten innerhalb einer Trägerkette wie z.B. $A_{1A} \equiv A_{1E}$ und $A_{2A} \equiv A_{2E}$ in Bild 6, treten dabei unabhängig voneinander auf. Es genügt daher, die Identitäten bei der Suche nach weiteren Verknüpfungsregeln einzeln zu betrachten. Die Untersuchung ganzer Trägerketten, die unter Umständen mehr als eine Identität aufweisen können (vgl. z.B. Bild 6), ist nicht erforderlich. Ist eine der Identitäten innerhalb einer Trägerkette nicht erlaubt, so gilt dies auch für die ganze Kette.

Nach diesen Vorbemerkungen kann mit der Untersuchung der möglichen Identitäten begonnen werden.

Als Ausgangspunkt der Betrachtung wird der Ausgang eines KEW gewählt. Eine Identität erhält damit folgende allgemeine Schreibweise:

$$X_{iA} \equiv Y_{jE}$$

Im einzelnen sind folgende Identitäten denkbar:

1. $A_{1A} \equiv A_{1E}$

In diesem Fall sind die aktiven Träger ersten Grades innerhalb der Trägerketten am Ein- und Ausgang identisch. Dies ist gestattet.

2. $A_{1A} \equiv A_{2E}$

Das Auftreten der Identität $A_{1A} \equiv A_{2E}$ hätte zur Folge, daß im KEW aus einem aktiven Träger zweiten Grades A_{2E} wieder ein solcher ersten Grades, nämlich A_{1A} entstehen würde. Da jedoch A_{2E} selbst aus einem aktiven Träger ersten Grades hervorgegangen ist, hätte eine Rückumwandlung stattgefunden. Dies würde zu Umwegen bei der Weiterleitung der Information führen und das Druckverfahren unnötig verlängern.

Damit entsteht eine neue Verknüpfungsregel:

6. Ein KEW, dessen Trägerketten die Identität $A_{1A} \equiv A_{2E}$ enthalten, führt zu komplizierten Druckverfahren. Es soll daher aus der Gruppe der sinnvollen Typen von KEW ausgeklammert werden.

3. $A_{1A} \equiv P_E$

Passive Träger sind noch nicht von der Information geprägt. Es ist also denkbar, daß sie im KEW mit der Information verknüpft und damit zu aktiven Trägern ersten Grades umgewandelt werden. Die Identität $A_{1A} \equiv P_E$ ist also erlaubt.

Sie tritt beispielsweise beim Ätzen eines Tiefdruckzylinders auf, der dabei vom passiven zum aktiven Träger umgewandelt wird (vgl. Bild 11: Grundaufbau des Tiefdruckverfahrens).

4. $A_{2A} \equiv A_{1E}$

Hier wurde aus dem aktiven Träger ersten Grades am Eingang des KEW ein solcher zweiten Grades am Ausgang. Diese Identität ist erlaubt.

5. $A_{2A} \equiv A_{2E}$

Die aktiven Träger zweiten Grades am Ein- und Ausgang eines KEW sind identisch. Dies ist erlaubt.

6. $A_{2A} \equiv P_E$

Aktive Träger zweiten Grades können nur aus solchen ersten Grades hervorgegangen sein. Dies ergibt sich aus der Definition der Trägerkette, nach der die zeitlich zuletzt aufgenommenen Träger vom ersten Grad sind. Ein passiver Träger kann daher im KEW nur zu einem aktiven Träger ersten Grades und nicht zu einem solchen zweiten Grades umgewandelt werden.

Somit ergibt sich eine weitere Verknüpfungsregel:

7. Ein KEW, in dessen Trägerketten die Identität $A_{2A} \equiv P_E$ auftritt, ist nicht realisierbar.

7. $P_A \equiv A_{1E}$

Hier wird der aktive Träger ersten Grades am Eingang des KEW in einen passiven Träger am Ausgang umgewandelt. Es ist jedoch im Hinblick auf die Weiterleitung der Information und auch verfahrenstechnisch umständlich, einen Träger erst zu einem aktiven zu machen mit der Absicht, ihn später als passiven zu verwenden. In diesem Falle wäre es sehr viel einfacher, die Information mit einem anderen aktiven Träger zu verknüpfen und direkt auf den Träger in seiner passiven Gestalt zu bringen.

Damit entsteht eine weitere Verknüpfungsregel:

8. Ein KEW, dessen Trägerketten die Identität $P_A \equiv A_1E$ enthalten, führt zu komplizierten Druckverfahren. Es soll daher aus der Gruppe der sinnvollen Typen von KEW ausgeklammert werden.

8. $P_A \equiv A_2E$

Das unter 7. Gesagte gilt sinngemäß auch für die vorliegende Identität. Ein aktiver Träger zweiten Grades war nämlich bei seinem Eintritt in das informationsverarbeitende System zunächst ein aktiver Träger ersten Grades, bevor er in einen solchen zweiten Grades umgewandelt wurde.

Somit erhält man die folgende Verknüpfungsregel:

9. Ein KEW, dessen Trägerketten die Identität $P_A \equiv A_2E$ enthalten, führt zu komplizierten Druckverfahren. Es soll daher aus der Gruppe der sinnvollen Typen von KEW ausgeklammert werden.

9. $P_A \equiv P_E$

Hier sind die passiven Träger am Ein- und Ausgang identisch. Dies ist erlaubt.

Es ist zu beachten, daß zulässige Identitäten nur dann in einer Trägerkette aufgenommen werden dürfen, wenn keine der Verknüpfungsregeln 1 bis 5 dies verbietet.

3.4.5 Ermittlung der sinnvollen Typen von KEW

Die Trägerketten am Ein- und Ausgang der 91 theoretisch denkbaren Typen von KEW können folgenden Aufbau besitzen

1. A_1
2. A_2
3. P
4. A_1, A_2
5. A_1 / P
6. A_2 / P
7. $A_1, A_2 / P$

Die Aufbaumöglichkeiten 2,3 und 6 sind nicht realisierbar, da die aktiven Träger ersten Grades fehlen (vgl. Verknüpfungsregel 3).

Man kann nun den Aufbau der Trägerkette am Ein- oder Ausgang eines KEW vorgeben und fragen, welche Trägerketten auf der Gegenseite des KEW unter Beachtung der Verknüpfungsregeln sinnvoll möglich sind.

Fall 1: Es sei die Trägerkette am Eingang eines KEW gegeben. Sie besitze folgenden Aufbau:

1. A_{1E} (die Träger A_{2E} und P_E fehlen)

Auf der Ausgangsseite des KEW sind folgende Trägerketten sinnvoll:

1. A_{1A}
2. A_{1A} / P_A
3. $A_{1A} \equiv A_{1E} / P_A$
4. $A_{1A}, A_{2A} \equiv A_{1E}$

2. A_{1E} / P_E

Auf der Ausgangsseite des KEW sind folgende Trägerketten sinnvoll:

1. A_{1A}
2. A_{1A} / P_A
3. $A_{1A} \equiv A_{1E} / P_A$
4. $A_{1A}, A_{2A} \equiv A_{1E} / P_A \equiv P_E$
5. $A_{1A} \equiv A_{1E}$
6. $A_{1A} / P_A \equiv P_E$
7. $A_{1A} \equiv P_E$
8. $A_{1A} \equiv P_E, A_{2A} \equiv A_{1E}$

3. A_{1E}, A_{2E}

Auf der Ausgangsseite des KEW sind folgende Trägerketten sinnvoll:

1. A_{1A}
2. A_{1A} / P_A

3. $A_{1A} \equiv A_{1E} / P_A$
4. $A_{1A} \equiv A_{1E}, A_{2A} \equiv A_{2E} / P_A$
5. $A_{1A} \equiv A_{1E}$

4. $A_{1E}, A_{2E} / P_E$

Auf der Ausgangsseite des KEW sind folgende Trägerketten sinnvoll:

1. A_{1A}
2. A_{1A}/P_A
3. $A_{1A} \equiv A_{1E} / P_A$
4. $A_{1A} \equiv A_{1E} / P_A \equiv P_E$
5. $A_{1A} \equiv A_{1E}$
6. $A_{1A} \equiv A_{1E}, A_{2A} \equiv A_{2E}$
7. $A_{1A} \equiv A_{1E}, A_{2A} \equiv A_{2E} / P_A$
8. $A_{1A} / P_A \equiv P_E$
9. $A_{1A} \equiv P_E$
10. $A_{1A} \equiv P_E, A_{2A} \equiv A_{1E}$
11. $A_{1A} \equiv P_E, A_{2A} \equiv A_{2E}$

Fall2: Es sei die Trägerkette am Ausgang eines KEW gegeben. Sie besitze folgenden Aufbau:

1. A_{1A}

Auf der Eingangsseite des KEW sind folgende Trägerketten sinnvoll:

1. A_{1E}
2. A_{1E} / P_E
3. A_{1E}, A_{2E}
4. $A_{1E}, A_{2E} / P_E$

5. $A_{1E} \equiv A_{1A} / P_E$
6. $A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E}$
7. $A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} / P_E$
8. $A_{1E} / P_E \equiv A_{1A}$
9. $A_{1E}, A_{2E} / P_E \equiv A_{1A}$

2. A_{1A} / P_A

Auf der Eingangsseite des KEW sind folgende Trägerketten sinnvoll:

1. A_{1E}
2. A_{1E} / P_E
3. A_{1E}, A_{2E}
4. $A_{1E}, A_{2E} / P_E$
5. $A_{1E} \equiv A_{1A} / P_E$
6. $A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E}$
7. $A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} / P_E$
8. $A_{1E} \equiv A_{1A}$
9. $A_{1E} / P_E \equiv P_A$
10. $A_{1E}, A_{2E} / P_E \equiv P_A$
11. $A_{1E} \equiv A_{1E}, A_{2E} / P_E \equiv P_A$

3. A_{1A}, A_{2A}

Auf der Eingangsseite des KEW sind folgende Trägerketten sinnvoll:

1. $A_{1E} \equiv A_{2A}$
2. $A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} \equiv A_{2A} / P_E$
3. $A_{1E} \equiv A_{2A} / P_E \equiv A_{1A}$
4. $A_{1A}, A_{2E} \equiv A_{2A} / P_E \equiv A_{1A}$
5. $A_{1E} \equiv A_{2A}, A_{2E} / P_E \equiv A_{1A}$

4. $A_{1A}, A_{2A} / P_A$

Auf der Eingangsseite des KEW sind folgende Trägerketten sinnvoll:

1. $A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} \equiv A_{2A}$
2. $A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} \equiv A_{2A} / P_E$
3. $A_{1E} \equiv A_{2A} / P_E \equiv P_A$

Die Ergebnisse für Fall 1 und Fall 2 wurden zur Kontrolle unabhängig voneinander ermittelt. Man hätte nämlich nur einen der beiden Fälle untersuchen brauchen und den zweiten durch einfache Umordnung der Kombinationen der Trägerketten erhalten. Diese Umordnung wäre erlaubt gewesen, da die Ergebnisse in beiden Fällen identisch sind und nur durch die zwei verschiedenen Betrachtungsweisen eine unterschiedliche äußere Form besitzen.

Zählt man die in Fall 1 und Fall 2 enthaltenen Kombinationen der Trägerketten zusammen, so ergeben sich jeweils 28 Kombinationen, d.h. 28 sinnvolle Typen von KEW.

3.4.6 Ermittlung der Häufigkeit der Trägerketten

Betrachtet man den Aufbau der 28 sinnvollen Typen von KEW, so finden sich z.B. zwei unter ihnen, bei denen die Eingangsträgerkette die Form A_{1E} aufweist (Fall 2: 1.1 und 2.1). Betrachtet man die Ausgangsseiten, so finden sich z.B. vier unter den 28 sinnvollen Typen von KEW, deren Ausgangsträgerkette die Form A_{1A}/P_A besitzt (Fall 1: 1.2, 2.2, 3.2 und 4.2). Unter den 28 Typen tritt somit die Trägerkette A_{1E} insgesamt zweimal, die Trägerkette A_{1A}/P_A insgesamt viermal auf. Die genannten Trägerketten weisen also die Häufigkeit 2 bzw. 4 auf. Ein KEW, das diese beiden Trägerketten besitzt, wird durch die Zahlenfolge 2–4 gekennzeichnet.

Werden die Trägerketten am Ein- und Ausgang der 28 sinnvollen Typen nach ihrer Häufigkeit geordnet, so entsteht die folgende Tabelle:

Trägerketten auf der Eingangsseite der 28 sinnvollen Typen von KEW	Häufigkeit
A_{1E}	2
A_{1E} / P_E	2
$A_{1E} \equiv A_{1A} / P_E$	2
$A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E}$	2

A_{1E}, A_{2E}	2
$A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} / P_E$	2
$A_{1E}, A_{2E} / P_E$	2
$A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} \equiv A_{2A} / P_E$	2
$A_{1E} \equiv A_{1A}$	1
$A_{1E} \equiv A_{2A}$	1
$A_{1E} / P_E \equiv P_A$	1
$A_{1E} \equiv A_{2A} / P_E \equiv P_A$	1
$A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} \equiv A_{2A}$	1
$A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} / P_E \equiv P_A$	1
$A_{1E}, A_{2E} / P_E \equiv P_A$	1
$A_{1E} / P_E \equiv A_{1A}$	1
$A_{1E} \equiv A_{2A} / P_E \equiv A_{1A}$	1
$A_{1E}, A_{2E} / P_E \equiv A_{1A}$	1
$A_{1E} \equiv A_{2A}, A_{2E} / P_E \equiv A_{1A}$	1
$A_{1E}, A_{2E} \equiv A_{2A} / P_E \equiv A_{1A}$	1
Summe	28

Trägerketten auf der Ausgangsseite
der 28 sinnvollen Typen von KEW

Häufigkeit

A_{1A} / P_A	4
$A_{1A} \equiv A_{1E} / P_A$	4
A_{1A}	4
$A_{1A} \equiv A_{1E}$	3
$A_{1A} \equiv P_E$	2
$A_{1A} / P_A \equiv P_E$	2

$A_{1A} \equiv P_E, A_{2A} \equiv A_{1E}$	2
$A_{1A} \equiv A_{1E}, A_{2A} \equiv A_{2E} / P_A$	2
$A_{1A} \equiv A_{1E} / P_A \equiv P_E$	1
$A_{1A}, A_{2A} \equiv A_{1E}$	1
$A_{1A} \equiv A_{1E}, A_{2A} \equiv A_{2E}$	1
$A_{1A} \equiv P_E, A_{2A} \equiv A_{2E}$	1
$A_{1A}, A_{2A} \equiv A_{1E} / P_A \equiv P_E$	1
Summe	28

Eine Trägerkette wird umso häufiger unter den 28 sinnvollen Typen von KEW auftreten, je weniger ihre Fähigkeit, durch Kombination mit einer Trägerkette auf der Gegenseite neue Typen eines KEW zu bilden, eingeschränkt ist. Diese Einschränkung der Kombinationsfähigkeit einer Trägerkette und damit auch die Verringerung ihrer Häufigkeit ist umso stärker, je komplizierter der Aufbau der Trägerkette ist und je mehr Verknüpfungsregeln zu beachten sind. Tritt nun eine Trägerkette besonders häufig auf, besitzt sie also eine hohe Kombinationsfähigkeit, so ist sie auch besonders vielseitig in informationsverarbeitenden Systemen einsetzbar. Das gleiche gilt auch für Typen von KEW, deren Trägerketten sehr häufig unter den 28 sinnvollen Typen von KEW anzutreffen sind. Die vielseitige Verwendbarkeit bestimmter Trägerketten bzw. Typen von KEW bedeutet gleichzeitig auch eine entsprechend große Freiheit bei der Auswahl der technischen Gestalt der Grundbausteine und damit auch des gesamten Systems.

Diese Überlegungen führen zur Forderung:

Man verwende zum Aufbau von Druckverfahren nach Möglichkeit KEW deren Trägerketten am Ein- und Ausgang besonders häufig unter den 28 sinnvollen Typen von KEW auftreten.

3.4.7 Zusammenstellung aller sinnvollen Typen von KEW geordnet nach der Häufigkeit ihrer Trägerketten am Ein- und Ausgang.

Werden die 28 sinnvollen Typen von KEW nach der Häufigkeit ihrer Trägerketten am Ein- und Ausgang geordnet, so ergeben sich KEW mit den Häufigkeiten 2–4, 2–3, 2–2, 2–1, 1–4, 1–2 und 1–1. Die folgende Tabelle enthält diese KEW, die natürlich mit den bereits früher ermittelten sinnvollen Typen von KEW identisch sind. Angegeben werden die Trägerketten auf der Ein- und Ausgangsseite der Elemente.

Sinnvolle Typen von KEW geordnet nach der Häufigkeit ihrer Trägerketten am Ein- und Ausgang.

Trägerkette auf der		Häufigkeit der Trägerkette unter den 28 sinnvollen Typen von KEW auf der	
Eingangsseite	Ausgangsseite	Eingangs- seite	Ausgangs- seite
A_1E	$\rightarrow A_{1A}/P_A$	2	4
A_1E	$\rightarrow A_{1A}$	2	4
A_1E/P_E	$\rightarrow A_{1A}/P_A$	2	4
A_1E/P_E	$\rightarrow A_{1A}$	2	4
$A_1E \equiv A_{1A}/P_E$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}/P_A$	2	4
$A_1E \equiv A_{1A}, A_{2E}$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}/P_A$	2	4
A_1E, A_{2E}	$\rightarrow A_{1A}$	2	4
A_1E, A_{2E}	$\rightarrow A_{1A}/P_A$	2	4
$A_1E \equiv A_{1A}, A_{2E}/P_E$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}/P_A$	2	4
$A_1E, A_{2E}/P_E$	$\rightarrow A_{1A}$	2	4
$A_1E, A_{2E}/P_E$	$\rightarrow A_{1A}/P_A$	2	4
$A_1E \equiv A_{1A}/P_E$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}$	2	3
$A_1E \equiv A_{1A}, A_{2E}$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}$	2	3
$A_1E \equiv A_{1A}, A_{2E}/P_E$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}$	2	3
$A_1E \equiv A_{1A}, A_{2E} \equiv A_{2A}/P_E$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}, A_{2A} \equiv A_{2E}/P_A$	2	2
$A_1E \equiv A_{1A}, A_{2E} \equiv A_{2A}/P_E$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}, A_{2A} \equiv A_{2E}$	2	1
$A_1E \equiv A_{1A}$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}/P_A$	1	4

Trägerkette auf der		Häufigkeit der Trägerkette unter den 28 sinnvollen Typen von KEW auf der	
Eingangsseite	Ausgangsseite	Eingangs- seite	Ausgangs- seite
$A_{1E}/P_E \equiv P_A$	$\rightarrow A_{1A}/P_A \equiv P_E$	1	2
$A_{1E}, A_{2E}/P_E \equiv P_A$	$\rightarrow A_{1A}/P_A \equiv P_E$	1	2
$A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E} \equiv A_{2A}$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}, A_{2A} \equiv A_{2E}/P_A$	1	2
$A_{1E}/P_E \equiv A_{1A}$	$\rightarrow A_{1A} \equiv P_E$	1	2
$A_{1E}, A_{2E}/P_E \equiv A_{1A}$	$\rightarrow A_{1A} \equiv P_E$	1	2
$A_{1E} \equiv A_{2A}/P_E \equiv A_{1A}$	$\rightarrow A_{1A} \equiv P_E, A_{2A} \equiv A_{1E}$	1	2
$A_{1E} \equiv A_{2A}, A_{2E}/P_E \equiv A_{1A}$	$\rightarrow A_{1A} \equiv P_E, A_{2A} \equiv A_{1E}$	1	2
$A_{1E} \equiv A_{2A}$	$\rightarrow A_{1A}, A_{2A} \equiv A_{1E}$	1	1
$A_{1E} \equiv A_{2A}/P_E \equiv P_A$	$\rightarrow A_{1A}, A_{2A} \equiv A_{1E}/P_A \equiv P_E$	1	1
$A_{1E} \equiv A_{1A}, A_{2E}/P_E \equiv P_A$	$\rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}/P_A \equiv P_E$	1	1
$A_{1E}, A_{2E} \equiv A_{2A}/P_E \equiv A_{1A}$	$\rightarrow A_{1A} \equiv P_E, A_{2A} \equiv A_{2E}$	1	1

Diese Tabelle enthält 11 verschiedene Typen von KEW, deren Trägerketten am Ein- und Ausgang zwei- bzw. viermal unter den insgesamt 28 sinnvollen Typen von KEW auftreten. Diese KEW seien im folgenden einfach mit KEW der Gruppe 2–4 bezeichnet. Ein Vergleich mit den restlichen 17 KEW zeigt, daß die KEW der Gruppen 2–4 einen besonders einfachen Aufbau besitzen. Zu dieser Gruppe gehören vor allem diejenigen KEW, bei denen die aktiven Träger ersten Grades am Ein- und Ausgang verschieden sind (vgl. auch Bild 3). Die Vielfalt der technischen Gestalt dieser zuletzt genannten Elemente ist besonders groß, da die Informationsträger am Ein- und Ausgang nicht identisch und daher im Prinzip frei wählbar sind.

Alle KEW der Gruppe 2–4 besitzen eine Eigenschaft, die sie vor den restlichen 17 KEW auszeichnet. Innerhalb einer Trägerkette existieren Informationsträger, ohne die eine Weiterleitung der Information undenkbar wäre. Hierzu gehören beispielsweise die Druckform und das Papier, die für den Transport bzw. die Aufnahme der Farbe und damit auch der Information unbedingt erforderlich sind. Daraus folgt, daß alle in einer Trägerkette erscheinenden passiven Träger gleichzeitig Hauptträger sind. Fehlen die passiven Träger, so müssen zwangsläufig die aktiven Träger zweiten Grades bzw. bei deren Fehlen diejenigen ersten Grades die Funktion eines Hauptträgers übernehmen. Sind nun die Träger am Ende der beiden Trägerketten am Ein- und Ausgang eines KEW verschieden, so folgt

daraus, daß der auf der Ausgangsseite vorhandene Hauptträger dem KEW und damit auch dem System neu zugeführt werden mußte.

Bei der Durchsicht der 28 sinnvollen Typen von KEW zeigt es sich, daß bis auf drei für die Praxis unbedeutende Ausnahmen, nur die KEW der Gruppe 2–4 unterschiedliche Hauptträger am Ein- und Ausgang besitzen. Die drei Ausnahmen sind das KEW der Gruppe 2–2 $A_{1E} \equiv A_{1A}$, $A_{2E} \equiv A_{2A} / P_E \rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E}$, $A_{2A} \equiv A_{2E} / P_A$, das KEW der Gruppe 1–2

$A_{1E} \equiv A_{1A}$, $A_{2E} \equiv A_{2A} \rightarrow A_{1E} \equiv A_{1A}$, $A_{2A} \equiv A_{2E} / P_A$ und das KEW der Gruppe 1–4 $A_{1E} \equiv A_{1A} \rightarrow A_{1A} \equiv A_{1E} / P_A$. Die beiden ersten Typen von KEW besitzen einen im Vergleich zu den KEW der Gruppe 2–4 komplizierten Aufbau. Bei der dritten Type ist A_{1E} am Eingang des KEW zunächst Hauptträger, während diese Funktion am Ausgang auf P_A übergeht. Man muß nun fragen, warum A_{1E} zunächst zum Hauptträger werden mußte, wenn diese Eigenschaft im KEW an P_A verlorengeht. Die Anwendung dieser Type eines KEW scheint daher zu Verfahren zu führen, die im Hinblick auf die Weiterleitung der Information unnötige Umwege beschreiten. Eingangs wurde festgestellt, daß die 11 Typen von KEW der Gruppe 2–4 unterschiedliche Hauptträger am Ein- und Ausgang besitzen. Was dies für den Einsatz dieser Elemente in informationsverarbeitenden Systemen bedeutet, wird im folgenden erläutert.

Die Information soll nach Möglichkeit ohne Umwege vom Eingang zum Ausgang des informationsverarbeitenden Systems übertragen werden, um die Kette der Grundbausteine so kurz wie möglich zu halten. Diese Kette wird um so kürzer, je kleiner die Zahl der KEW und der Hauptträger ist.

Ein informationsverarbeitendes System, das ausschließlich KEW der Gruppe 2–4 enthält, leitet die Information direkter weiter und ist dadurch auch kürzer als ein System, das zwar mindestens gleichviele Hauptträger besitzt, aber Elemente aus der Gruppe der restlichen 17 KEW verwendet.

Diese Überlegungen zeigen, daß die KEW der Gruppe 2–4 die Information besonders direkt weiterleiten können. Wegen der Einführung eines neuen Hauptträgers ist auch die Freiheit bei der Auswahl ihrer technischen Gestalt a priori größer als bei den restlichen KEW. Aus diesen Gründen sowie aufgrund der bereits bekannten Forderung, möglichst KEW mit großen Häufigkeiten der Trägerketten am Ein- und Ausgang zu verwenden, sollten die KEW der Gruppe 2–4 bei der Vereinfachung und bei der Neuentwicklung des Grundaufbaues von Systemen bevorzugt eingesetzt werden, sofern dadurch nicht die Zahl der Hauptträger des untersuchten Systems ansteigt, was zu Umwegen bei der Weiterleitung der Information führen würde.

3.5 Das KEW im informationsverarbeitenden System

Eine Untersuchung des Grundaufbaues informationsverarbeitender Systeme wird im allgemeinen dann erfolgen, wenn es gilt, neue Verfahren zu entwickeln oder bereits vorhandene zu verbessern.

Wie im Abschnitt 3.3 bereits dargelegt wurde, hängt das Vorhandensein von Kanalelementen ohne Trägerwechsel zwischen den KEW von deren technischer Gestalt ab. Die KEW bilden gleichsam die Kernelemente eines Druckverfahrens, dessen charakteristisches Aussehen sie bestimmen. Aus diesem Grund wird die Untersuchung des Grundaufbaues der Druckverfahren im wesentlichen zu einer Betrachtung der Kette der KEW. Die Grundzüge dieser Betrachtungsweise werden im folgenden dargelegt.

3.5.1 Die Entwicklung neuer Systeme

Gegeben sind im allgemeinen:

1. Trägerkette am Eingang des Systems, z.B. Dia (Farbe auf Trägerfolie, A/P).
2. Die Trägerkette am Ausgang des Systems, z.B. fertiger Druck (Farbe auf Bedruckstoff, A/P).
3. Trägerketten im Innern des Systems, falls die vorliegende Aufgabe dies erfordert, z.B. elektromagnetische Welle (A) bei der drahtlosen Übertragung der Information.

T_E, T_A gegebene Trägerketten

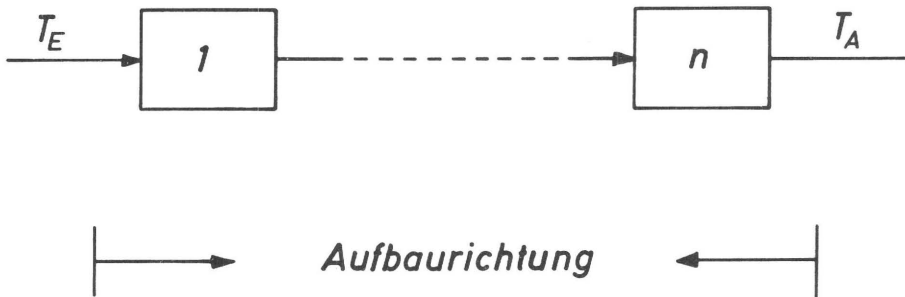


Bild 7: Der Aufbau neuer Systeme bei gegebenen Trägerketten T_E und T_A am Ein- und Ausgang

Ausgehend von den festliegenden Trägerketten (T) wird das System unter bevorzugter Verwendung der KEW der Gruppe 2–4 schrittweise aufgebaut.

Sind nur die Trägerketten am Ein- und Ausgang (T_E, T_A) des Systems gegeben (Bild 7), so besteht dies zunächst nur aus einem einzigen KEW, dessen technische Realisierbarkeit geprüft wird. Hierbei können die Methoden der Höheren Konstruktionslehre gute Dienste leisten (z.B. [7, 8, 9, 10]). Läßt sich das aus nur einem KEW bestehende System nicht verwirklichen, wird ein weiteres Element eingefügt. Gleichzeitig tritt eine neue Trägerkette auf. Die Frage nach ihrer technischen Realisierbarkeit kann beispielsweise mit Hilfe eines morphologischen Schemas [6] beantwortet werden. Eine derartige Untersuchung muß für alle möglichen sinnvollen Typen des neuen KEW (bevorzugt für die 11 der Gruppe 2–4) durchgeführt werden. Die dabei entstehende Fülle von denkbaren Trägerketten wird durch die technischen Möglichkeiten eingeengt. Hier kommt es sehr darauf an, ob auf bereits vorhandene Möglichkeiten zurückgegriffen oder ganz bewußt nach bisher unbekannten Lösungen gesucht werden soll. Im ersten Fall wird das morphologische Schema im allgemeinen so übersichtlich sein, daß eine Auswertung ohne Zuhilfenahme von Rechenautomaten erfolgen kann. Bei der Auswertung helfen wieder die Methoden der Höheren Konstruktionslehre.

Besteht ein System aus mehr als einem KEW, so muß nach jeder Hinzunahme eines weiteren Elementes geprüft werden, ob die Zahl der KEW minimal ist. Im anderen Fall wären beim Aufbau des Systems Umwege beschritten worden.

Das zu prüfende System besitze n KEW (Bild 8).

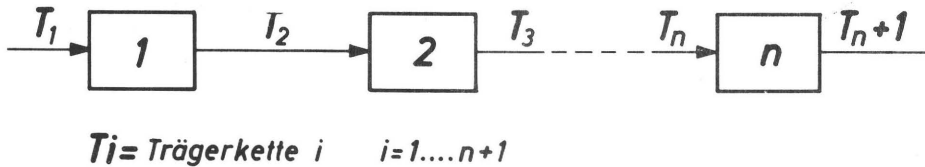


Bild 8

Das n -te KEW wurde eben als letztes Glied in die Kette der KEW aufgenommen.

Man hat nun zu untersuchen, ob sich alle KEW zwischen den Trägerketten T_{n+1} und T_1 durch ein einziges KEW ersetzen lassen.

Man fragt also nach dem Übergang

von T_{n+1} auf T_1 ,

oder falls dieser nicht möglich ist, nach dem Übergang

von T_{n+1} auf T_2

von T_{n+1} auf T_3 usw.

und schließlich nach dem Übergang

von T_{n+1} auf T_{n-1} .

Durch die Untersuchung der Realisierbarkeit dieser Übergänge wird eine unnötig lange Kette von KEW vermieden.

3.5.2 Die Verbesserung gegebener Systeme

Diese Aufgabe läßt sich in drei Schritten lösen:

1. Aufzeichnen des Grundaufbaues des Systems (vgl. Bild 9, 10, 11).
2. Ersatz der für die Weiterleitung der Information weniger günstigen Typen von KEW durch solche der Gruppe 2–4. Hierbei ist zu beachten, daß die Zahl der Hauptträger nicht ansteigt, da sonst Umwege in das System eingebaut werden.
3. Verkürzung der nach Schritt 2 verbleibenden Kette auf eine Minimallänge unter Ausschöpfung der technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten.

Bei der Durchführung der Schritte 2 und 3 helfen wieder das morphologische Schema und die Methoden der Höheren Konstruktionslehre.

Entstehen bei der Verbesserung gegebener Systeme völlig neuartige Ketten, so gilt sinngemäß das im Abschnitt über die Entwicklung neuer Systeme Gesagte.

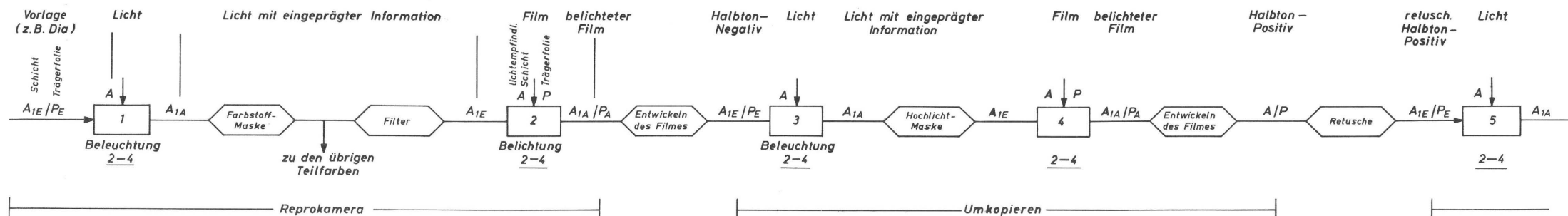
Die Lösungen dieser beiden Aufgaben führt je nach Ausführlichkeit der Behandlungsweise zu einer mehr oder weniger detaillierten Vorstellung von der technischen Gestalt eines Druckverfahrens, dessen Grundaufbau optimal einfach ist. Vor der praktischen Einführung des Verfahrens hat noch eine informationstheoretische Untersuchung zu zeigen, inwieweit es den vorgegebenen Anforderungen an die Druckqualität und die Druckleistung gerecht wird. Schließlich muß eine Überprüfung der Kosten die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erweisen.

3.6 Der Grundaufbau der drei Hauptdruckverfahren

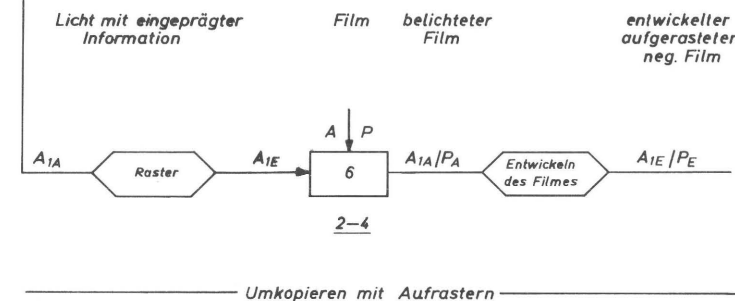
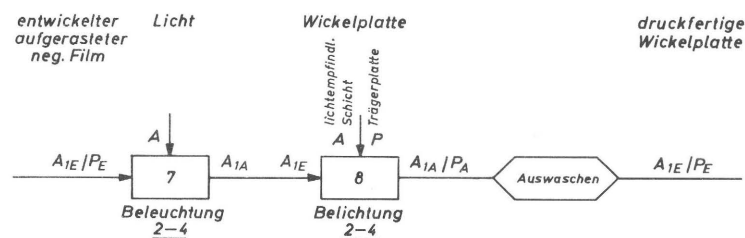
Dieser Abschnitt dient der praktischen Anwendung der Systematik am Beispiel der drei Hauptdruckverfahren, ohne dabei die im Abschnitt 3.5 beschriebenen Methoden zur Neuentwicklung und Verbesserung von Verfahren streng anzuwenden.

Ausgehend von drei in der Praxis angewandten Verfahrensweisen wird zunächst der Grundaufbau der Verfahren in Bild 9, 10 und 11 dargestellt. Darauf folgt ein Vergleich der drei Hauptdruckverfahren. Der Grundaufbau der drei Hauptdruckverfahren, wie er in den Bildern 9, 10, 11 dargestellt wird, gilt für jeweils eine Teilfarbe beim Mehrfarben-

Reprografie



Druckformen-herstellung



Druckvorgang

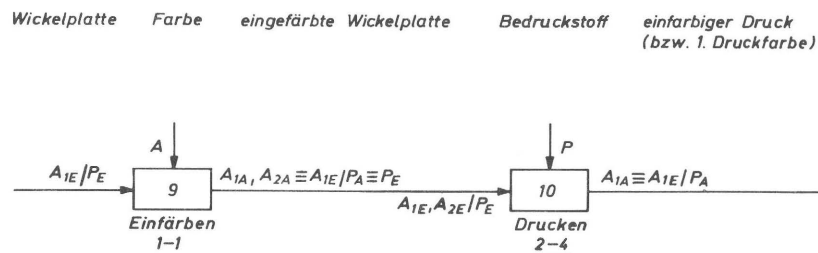
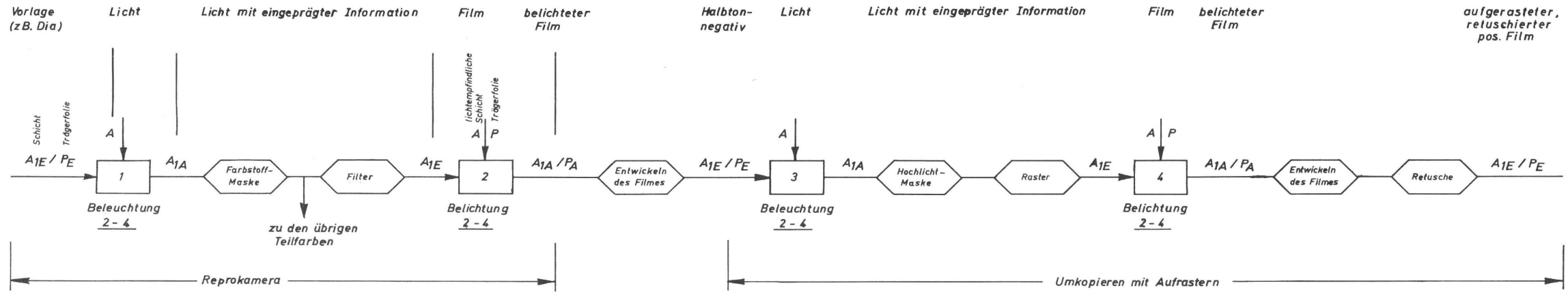
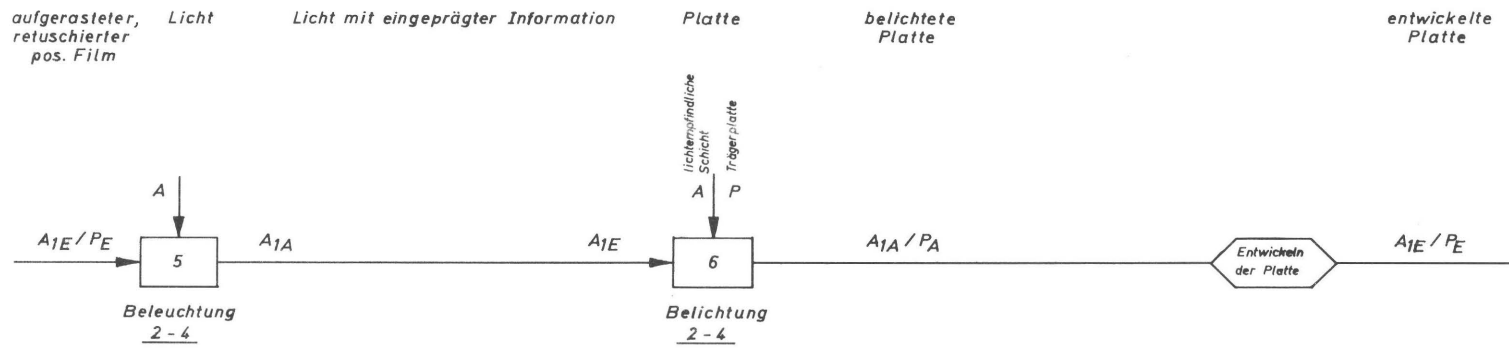


Bild 9: Grundaufbau des Hochdruckverfahrens
(mit Wickelplatte)

Reprophotografie



Druckformen -
herstellung



Druckvorgang

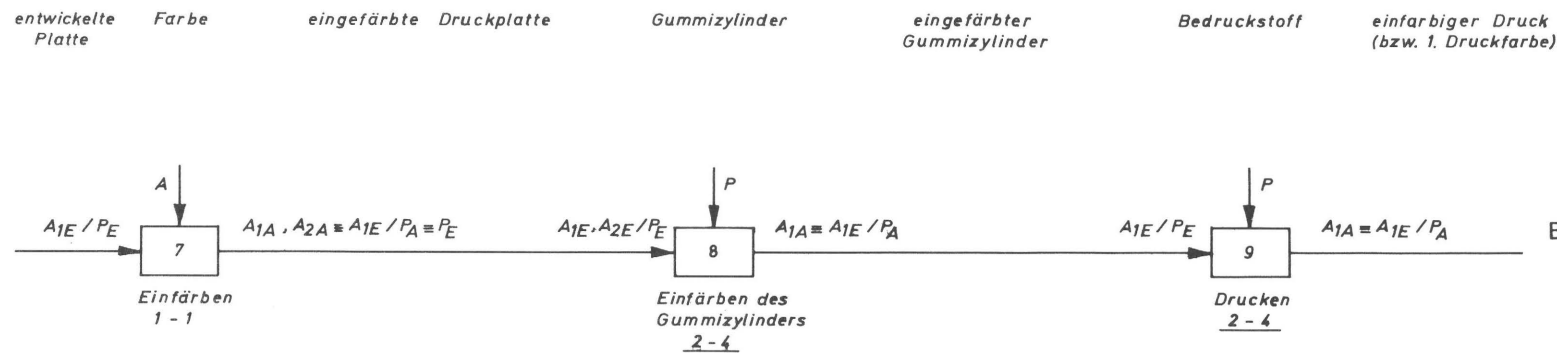


Bild 10: Grundaufbau des Offsetdruckverfahrens

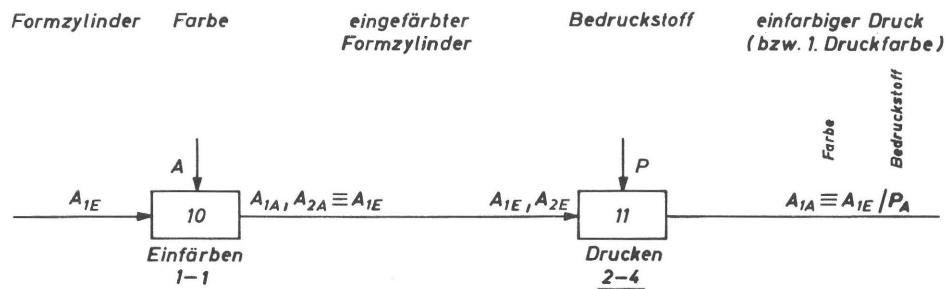
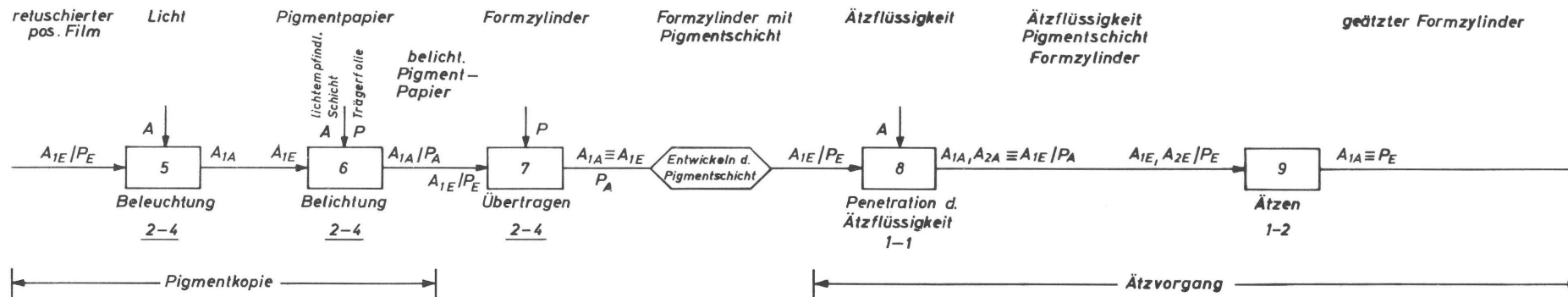
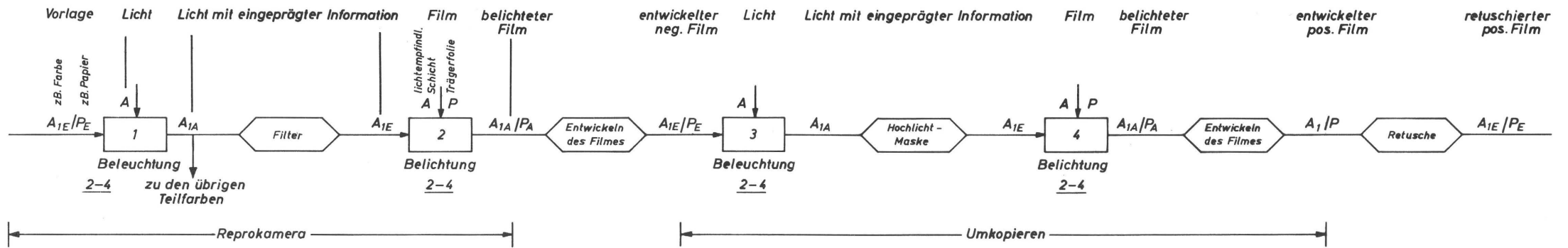


Bild 11:

Grundaufbau des Tiefdruckverfahrens

druck und abgesehen von kleinen Abweichungen bei der Reprophotographie auch für den Einfarbedruck. Bild 12 zeigt den Grundaufbau eines Vierfarbedruckverfahrens, bei dem die in den Bildern 9, 10, 11 dargestellte Kette der Grundbausteine für eine Druckfarbe sich für jede weitere wiederholt. Bei vier Druckfarben entstehen vier Teilketten, die zu einem Gesamtsystem miteinander verknüpft werden.

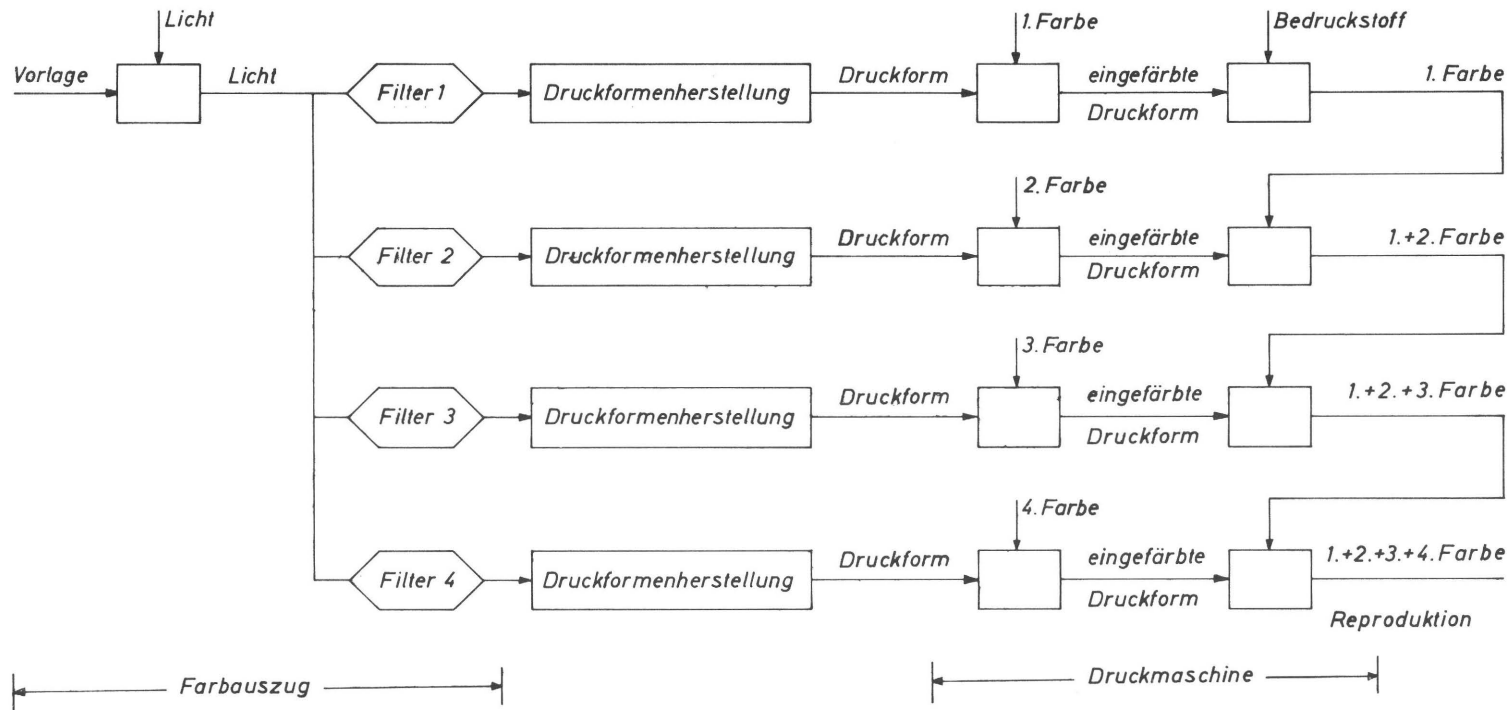
Wie bereits in der Einleitung zu dieser Arbeit erwähnt wurde, ist die Informationsübertragung mit der Herstellung der fertigen Reproduktion nicht zu Ende. In Bild 12 müßten noch die Übertragungskanäle eingefügt werden, die zum Empfänger des Druckproduktes führen. Da die Information hierbei ihre Träger nicht mehr wechselt, müßten diese Übertragungskanäle als Kanalelemente ohne Trägerwechsel am Ende des in Bild 12 dargestellten Prozesses eingezeichnet werden.

3.6.1 Aufzeichnen des Grundaufbaues der Verfahren.

Zur Verfügung stehen die 28 sinnvollen Typen der KEW und die Kanalelemente ohne Trägerwechsel. Wie in Abschnitt 3.1 zur Erläuterung von Bild 3 bereits gezeigt wurde, wird der Transport der Information durch das System verfolgt. Die Beachtung der Abteilver-schrift für ein KEW (vgl. Abschnitt 3.4.1) bietet die Gewähr, daß kein Bereich des Verfahrens übersehen wird, in dem Informationsverluste auftreten könnten. Es entsteht zunächst eine vollständige Kette der KEW mit denjenigen Kanalelementen ohne Trägerwechsel dazwischen, die bereits beim Aufzeichnen der KEW auffielen. Anschließend muß noch geprüft werden, ob keine Kanalelemente ohne Trägerwechsel vergessen wurden.

Die Beschriftung der Trägerketten, der Kanalelemente mit und ohne Trägerwechsel dient der Fixierung der Ausgangssituation. Bei dem Vergleich des Grundaufbaues verschiedener Verfahren oder bei dem Versuch ein System durch Verkürzen der Kette seiner Grundbausteine zu verbessern, interessiert zunächst nur die Type der KEW bzw. die formelhafte Gestalt der Trägerketten. Die Systematik dient gleichsam als Denkhilfe, welche die Gedanken von der technischen Gestalt der Ausgangssysteme befreit, damit um so leichter der für die Weiterleitung der Information wichtige Grundaufbau der Systeme erkannt werden kann. Die Gedanken sind dann frei für die Entwicklung neuer Systeme.

Unterhalb der KEW sind die Häufigkeiten der Trägerketten am Ein- und Ausgang angegeben (vgl. Abschnitt 3.4.6 und 3.4.7). Die Zahlen der KEW der Gruppe 2–4, die sich für die direkte Weiterleitung der Information besonders eignen, sind der Deutlichkeit halber unterstrichen.



Grundaufbau eines Vierfarbendruckverfahrens

Bild 12: Grundaufbau eines Vierfarbendruckverfahrens

3.6.2 Vergleich des Grundaufbaues der drei Hauptdruckverfahren

Reprophotographie

Der Aufbau der Reprophotographie ist für alle drei Verfahren nach Bild 9, 10, 11 prinzipiell gleich. Beim Hochdruckverfahren wird die Kette jedoch um die KEW 5 und 6 verlängert, da zur Formherstellung ein negativer Film verlangt wird, was einen zusätzlichen Umkopierprozeß erfordert.

Druckformenherstellung

Bei dem hier dargestellten Hochdruckverfahren sollen mit einem Photopolymer beschichtete Wickelplatten (z.B. Dycril) verwendet werden. Unter dieser Voraussetzung besitzen Hoch- und Offset-(Flachdruck)-Verfahren den gleichen Grundaufbau der Druckformenherstellung. In dieser Hinsicht sind beide Verfahren völlig gleichwertig.

Der Tiefdruck besitzt eine wesentlich längere Kette von Grundbausteinen zur Herstellung der Druckform. Bei gleicher Vorlage und vorgegebener Druckqualität der Reproduktion dürfen beim Tiefdruck wegen der größeren Zahl der Grundbausteine im Mittel geringere Informationsverluste pro Grundbaustein zugelassen werden als bei den beiden anderen Verfahren. Dies führt zu im Durchschnitt höheren Anforderungen an die Übertragungseigenschaften der einzelnen Grundbausteine.

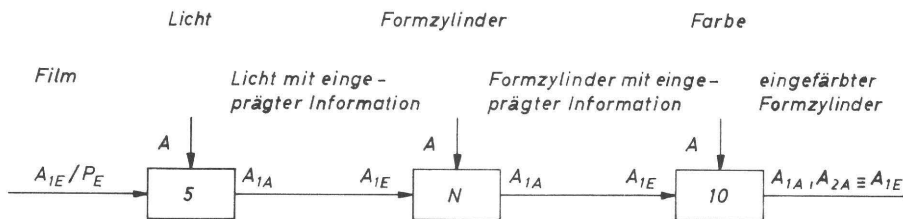


Bild 13

Eine Verkürzung der Verfahrenskette bei der Tiefdruckformenherstellung könnte beispielsweise zu einem Grundaufbau führen, wie er in Bild 13 dargestellt ist. Dabei werden die KEW 6 bis 9 zu einem einzigen Element, dem KEW N, zusammengefaßt. In diesem Grundbaustein geht die Information vom Träger A_{1E} direkt auf den neu eingeführten Träger A_{1A} über.

Für die technische Gestalt des KEW N bedeutet dies, daß das vom Film kommende Licht die Näpfchen in der Oberfläche des Formzylinders direkt erzeugt. Da dieser Vorgang zur Zeit technisch nicht realisierbar erscheint, muß auf eine direkte Erzeugung der Näpfchen verzichtet werden. Der Formzylinder könnte jedoch mit einem Photopolymer beschichtet sein. Nach dem Belichtungsvorgang, dargestellt durch das KEW N, müßten die Näpfchen dann noch ausgewaschen werden. Im Grundaufbau käme damit noch ein Kanalelement ohne Trägerwechsel zwischen den beiden KEW N und 10 zu liegen.

Die Zusammenfassung der KEW 6 bis 9 der Tiefdruckformenherstellung nach Bild 11 führte beispielhaft zu zwei Prozessen, von denen zumindest der zweite der beiden bereits in der Fachwelt diskutiert wird.

Es wurden also keine völlig unbekannten Prozesse gefunden. Dies war auch nicht der Hauptzweck der Betrachtungen. Vielmehr sollte gezeigt werden, wie bei der Verkürzung der Systeme fast zwangsläufig auch eine Vorstellung von der technischen Gestalt der neuen KEW entsteht. Die Ursache hierfür liegt in der Eigenschaft eines KEW begründet, die Information vom aktiven Träger ersten Grades am Eingang direkt an denselben am Ausgang des Elementes weiterzugeben.

Druckvorgang

Der Grundaufbau des Druckvorganges ist beim Hoch- und Tiefdruckverfahren der gleiche.

Beim Offsetdruck verlängert der Gummizylinder die Kette um ein KEW. Insgesamt gesehen besitzen das Hoch- und das Offsetdruckverfahren bis auf das KEW, welches die Einführung des Gummizylinders symbolisiert, den gleichen Grundaufbau.

4. Informationstheorie und Drucktechnik

4.1 Einige Begriffe der Informationstheorie

Da die Erkenntnisse der Informationstheorie einerseits noch nicht Allgemeingut der Techniker geworden sind, andererseits jedoch in Zukunft immer stärker in der Technik Anwendung finden werden, sollen zunächst einige Begriffe der Informationstheorie erläutert werden.

Information

Nach Berger [11] entsteht eine Information durch einmalige oder fortgesetzte Auswahl aus einer Menge von vorgegebenen Möglichkeiten. Diese Auswahl kann eingeschränkt sein durch gewisse Regeln, aber sie ist nicht determiniert. Die Auswahl erfolgt durch den Sender (Nachrichtenquelle), der vom Empfänger beobachtet wird. Die Beschränkung auf eine verabredete Menge von Zeichen bedeutet eine Codierung im allgemeinsten Sinne. Die Informationstheorie fragt nun nach der Zahl der Auswahlmöglichkeiten.

Die einfachste Auswahl ist diejenige zwischen zwei gleichwahrscheinlichen Möglichkeiten, z.B. ja oder nein bzw. 0 oder 1. Eine solche Wahl erzeugt und vermittelt eine bestimmte Informationsmenge, die in der Informationstheorie als Einheit verwendet wird; sie heißt „1 bit“ und ist dimensionslos. Der sogenannte Informationsgehalt, der bei der Auswahl aus n gleich wahrscheinlichen Möglichkeiten entsteht, errechnet sich zu

$$I = I_d n \quad \text{bit/Möglichkeit}$$

Hierbei ist $I_d n$ gleich ${}_2 \log n$, also der Logarithmus von n zur Basis 2, z.B. $n = 8$, $I = I_d 8 = 3$; d.h., es sind drei Ja-Nein-Entscheidungen nötig, um eine der insgesamt 8 Möglichkeiten auszuwählen. Bei jeder dieser einzelnen Ja-Nein-Entscheidungen entsteht die Informationsmenge 1 bit, bei drei Ja-Nein-Entscheidungen also die Informationsmenge 3 bit.

Bei einem bekannten Fernsehspiel soll der Beruf einer Person mit Hilfe von 20 Fragen ermittelt werden. Die Antwort darf jedesmal nur Ja oder Nein lauten. Wird nun so gefragt, daß jede dieser beiden Antworten mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftritt, so entsteht nach jeder Antwort die Information 1 bit, bei 20 Fragen und Antworten somit die gesamte Informationsmenge 20 bit. Mit Hilfe dieser Information muß es nun möglich sein, aus insgesamt $2^{20} \approx 10^6$ Möglichkeiten eine bestimmte, im vorliegenden Fall einen bestimmten Beruf, zu ermitteln.

Der Inhalt der Information, also die Bedeutung der Symbole und Zeichen für den Beobachter, wird durch den Informationsgehalt a priori nicht berührt. Die Betrachtung des Inhalts einer Information, die Semantik, wird aus der Informationstheorie, wie sie von Shannon im Jahre 1948 entwickelt wurde, ausgeschlossen. Zemanek schreibt [12]: „Die Einschränkung auf die bloße Kombinatorik der Zeichen, auf die Gesetzmäßigkeit ihres

Auftretens, darf bei der Anwendung der Informationstheorie nicht übersehen werden. Wie weit Sinn und Bedeutung durch ein Schema erfaßbar wären, ist noch kaum untersucht.“ Auch bei der Anwendung der Informationstheorie in der Drucktechnik bleibt der Inhalt einer Information unberücksichtigt. Es wird jedoch das Farbempfinden des Menschen in die Betrachtungen mit einbezogen. Der Informationsgehalt läßt sich mit dem Empfinden des menschlichen Auges koppeln, so daß Detailreichtum und Feinheit der Farbabstufung eines Bildes ihren zahlenmäßigen Niederschlag im Informationsgehalt finden.

Über die Informationsverarbeitung im Menschen selbst wird dabei nichts ausgesagt, was auch für die Anwendung der Informationstheorie in der Drucktechnik nicht unmittelbar erforderlich ist. Das Wissen um die Informationsverarbeitung im Menschen vertieft jedoch das Verständnis der Drucktechnik. Einen Einblick in die Informationsverarbeitung durch den Menschen vermittelt K. Küpfmüller in [13].

Der Informationsgehalt eines Ereignisses x_i , oder einfacher ausgedrückt, die Information eines Ereignisses x_i , hängt mit dem Grad der Seltenheit dieses Ereignisses zusammen [14, 15, 16,]. Der Grad der Seltenheit kann durch reziproke Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Ereignisses x_i also durch

$$\frac{1}{p(x_i)}$$

ausgedrückt werden.

Die Information, die durch das Eintreten dieses Ereignisses gewonnen wird, errechnet sich dann wie folgt:

$$I(x_i) = \text{Id} \frac{1}{p(x_i)} = - \text{Id} p(x_i)$$

Je unwahrscheinlicher ein Ereignis ist, desto größer wird seine Information (Informationsgehalt) [11].

Treten n verschiedene Ereignisse x_i mit den Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$ auf, so errechnet sich der mittlere Informationsgehalt pro Ereignis x_i zu

$$32 \quad H(x) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \cdot \text{Id} p(x_i) \quad \text{bit/Ereignis}$$

Dieser Ausdruck H ist mathematisch gesehen der sogenannte Erwartungswert für den Informationsgehalt $I(x_i) = - \text{Id} p(x_i)$ [17]. Es blieb Claude Shannon vorbehalten, im Jahre 1948 den Informationsbegriff mathematisch exakt zu definieren [18, vgl. auch Shannon in 19]. Eine eingehende Erläuterung des Informationsbegriffes gibt auch Robert M. Fano in seinem 1961 erschienenen Buch „Transmission of Information“, auf dessen deutsche Übersetzung verwiesen wird [20]. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit stehen vor allem die Kapitel 1 bis 5. Der Informationsbegriff wird in Kapitel 2 hergeleitet und

diskutiert. Manchmal wird H einfach mit Information bezeichnet. Über die verschiedenen informationstheoretischen Begriffe gibt die Empfehlung NTG 0102 aus dem Jahre 1965 Auskunft. Abweichend von dieser Empfehlung werden mittlere Informationsgehalte im folgenden einfach mit Informationsgehalt bezeichnet, also z.B. Transinformationsgehalt (vgl. Abschnitt 4.3) statt mittlerer Transinformationsgehalt.

Information und Nachricht

Nach Neidhardt [21] ist „Nachricht“ ein Unterbegriff der „Information“. Eine Nachricht ist hierbei eine speziell zur Einwirkung auf die Sinnesorgane des Menschen bestimmte physikalische Zustandsfolge.

Arbeiten zwei Kraftwerke im Verbundbetrieb, so tauschen sie Informationen aus. Wenn zwei Menschen miteinander telefonieren, so werden Nachrichten übermittelt.

Zemanek [22] fordert dagegen eine schärfere Trennung der Begriffe Information und Nachricht. Er bezeichnet die „naturwissenschaftlich definierte Nachricht“ als Information und reserviert den Begriff Nachricht für die Sphäre außerhalb der maschinellen Verarbeitung, also für die menschliche Kommunikation. Aus diesem Grunde wurde bei der Systematik der Druckverfahren der eine der beiden Grundbausteine Informationsverarbeitungselement (IVE) genannt, also der Überbegriff „Information“ benutzt.

Es zeigt sich also, daß die Begriffe Information und Nachricht in ihrer Bedeutung noch nicht eindeutig definiert sind. Nach Neidhardt könnte auch die Bezeichnung Nachrichtenverarbeitungselement gewählt werden, da das Gesamtsystem der Kommunikation zwischen Menschen dient. Zemanek würde dieser Wahl nicht zustimmen, da seiner Auffassung nach in technischen Systemen (z.B. Telefon) nur Informationen verarbeitet werden können.

Signal

Information bzw. Nachricht sind immaterielle Größen, zu deren Transport Träger nötig sind, die dabei zu Signalen werden. Ein Spannungs- oder Stromverlauf, aber auch Rasterpunkte mit dem darunter liegenden Bedruckstoff sind Signale.

Redundanz

Überflüssige Information ist redundant. Wenn jemand in München auf die Frage: „Wo befinden wir uns jetzt?“ die Antwort erhält: „In der Nähe des Hauptbahnhofes in München“, so wird die Stadtbezeichnung im allgemeinen eine redundante Information sein.

Irrelevanz

Information, nach der nicht gefragt war, ist irrelevant. Lautet die Antwort auf die Frage: „Wo bin ich?“ vielleicht: „Es ist jetzt 9.30 Uhr“, so ist diese Information irrelevant.

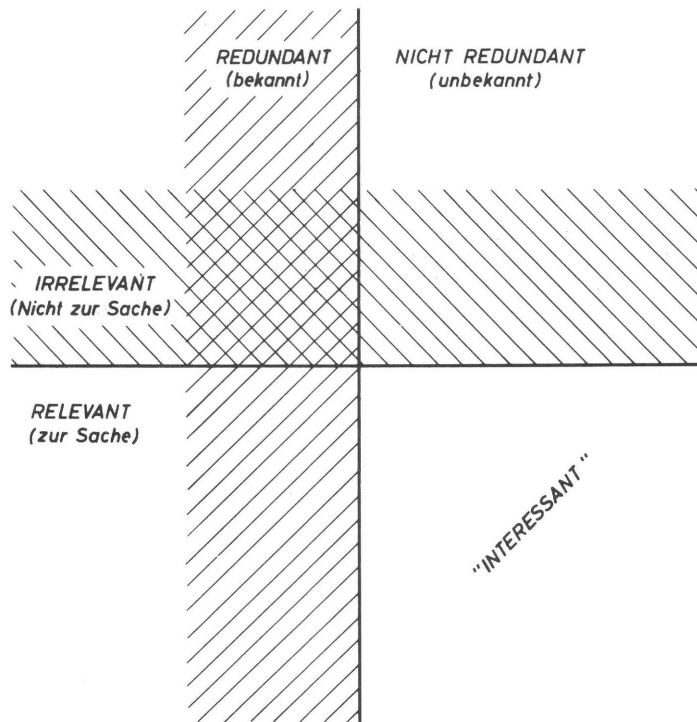


Bild 14

Relevanz

Relevant ist die Information, nach der gefragt war. Nicht redundante, relevante Information ist interessant.

Eine recht anschauliche Verdeutlichung dieser Begriffe gibt Schouten [23], die auch Neidhardt verwendet [24]. Bild 14 zeigt die Darstellung nach Schouten.

Wichtig ist, daß Klarheit besteht, worauf sich die eben beschriebenen Begriffe beziehen. In den aufgeführten Beispielen beziehen sich Redundanz, Relevanz und Irrelevanz auf den Inhalt der Information. Dieser wird jedoch in der Informationstheorie nicht betrachtet. Hier beschreiben diese Begriffe Eigenschaften der Signale. Unerwünschte Störsignale sind somit irrelevant. Auswertbare, relevante Signale sind redundant, sofern sie für das Verständnis der übertragenen Information nicht unbedingt erforderlich sind. Der verbleibende Rest der auswertbaren Signale ist interessant.

4.2 Die Information eines Bildes

Da in diesem Abschnitt sowohl vom Inhalt als auch vom Gehalt einer Information die Rede sein wird, soll im folgenden zur Vermeidung von Unklarheiten streng zwischen diesen beiden Begriffen unterschieden werden.

4.2.1 Farbraum und Farbraumelement

Ein Bild läßt sich zeilen- und spaltenweise in kleine quadratische Flächenelemente zerlegen, deren Größe letztlich vom flächenhaften Auflösungsvermögen des menschlichen Auges abhängt. In der Drucktechnik ist die Rasterlinienzahl rz ein Maß für die Zahl dieser Bildelemente pro Zeilen- bzw. Spalteneinheitslänge. Diese Einheitslänge beträgt gewöhnlich ein Zentimeter z.B. $rz = 70$ Bildelemente/cm (Bild 15).

Innerhalb eines Bildelementes befinden sich im allgemeinen mehrere Farbflächen. In der Drucktechnik sind dies z.B. die Rasterpunkte von vier Druckfarben, die sich zudem teilweise oder völlig überdecken können, sowie unbedruckte Flächen des Bedruckstoffes. Jede dieser Teilflächen eines Bildelementes einschließlich der unbedruckten Fläche des Bedruckstoffes sendet einen Farbreiz zum Auge. Bei den folgenden Überlegungen sei nun der Abstand zwischen Betrachter und Bildfläche so gewählt, daß das flächenhafte Auflösungsvermögen des Beobachterauges der Größe eines Bildelementes entspricht. In diesem Fall summieren sich die von den Teilflächen eines Bildelementes herrührenden Farbreize im menschlichen Auge zu einem resultierenden Farbreiz, der als Farbe des betrachteten Bildelementes empfunden wird.

Entfernt sich der Betrachter vom Bild, so verwischen die Details; er empfindet einen Informationsverlust. Nähert er sich dem Bild immer mehr, so erkennt er schließlich einzelne Rasterpunkte; der Beobachter erhält irrelevante Information, nach der nicht gefragt war. Dies ist beispielsweise beim Betrachten eines großen Werbeplakates aus einer normalen Sehweite von 25 cm der Fall. Hier sind die einzelnen Rasterpunkte zu erkennen, was störend auf den Gesamteindruck des Bildes wirkt.

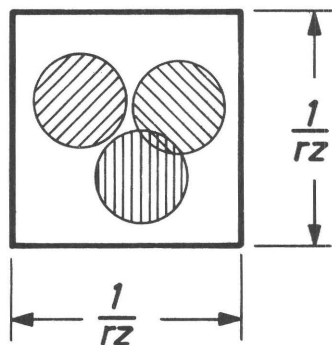


Bild 15

Derartige Informationsänderungen lassen sich jederzeit durch eine Korrektur des Betrachtabstandes ausgleichen, sie bedürfen also keiner besonderen Beachtung und werden daher aus den folgenden Untersuchungen ausgeklammert.

In einem Gedankenexperiment werden zwei Bildelemente betrachtet, die nebeneinander oder auch in einiger Entfernung voneinander auf einem Druck liegen. Der eine der beiden von den Bildelementen ausgehenden Farbreize sei unveränderbar fest, während der andere seine Größe beispielsweise durch ein Variieren der Farbschichtdicke verändern kann. Beim Vergleich beider Farbreize wird ein Beobachter nur solche Veränderungen des Farbunterschiedes beider Bildelemente bemerken, die außerhalb des spektralen Auflösungsbereiches des menschlichen Auges liegen.

Der Versuch zeigt, daß die Größe der Farbreize in Grenzen, die durch das spektrale Auflösungsvermögen des Auges gegeben sind, variieren kann, ohne daß der Beobachter dies merkt. Ferner wird deutlich, daß ein Informationsverlust für den Beobachter erst beim Vergleich von mindestens zwei Farbreizen (Ereignissen) entstehen kann. Störungen während der Bildübertragung verursachen Änderungen der Farbreize der einzelnen Bildelemente. Dies führt im allgemeinen zu einer Verringerung des Detailreichtums; das Bild verflacht. Informationstheoretisch bedeutet dies, daß die Zahl der unterscheidbaren Ereignisse auf der Bildfläche und damit auch der Informationsgehalt kleiner geworden ist.

Eine ideale Volltonfläche besitzt keinerlei vom Beobachter unterscheidbare Merkmale. Daher ist auch ihr Informationsgehalt drucktechnisch gesehen gleich Null. Sie gewinnt natürlich einen bestimmten Informationsgehalt, sobald sie mit anderen Volltonflächen verglichen wird. In diesem Fall sind die interessanten Ereignisse nicht mehr die einzelnen Bildelemente, sondern die Gesamtheit aller betrachteten Volltonflächen.

Jede Farbe läßt sich durch einen Vektor \vec{F} im Farbraum darstellen, dessen Komponenten beispielsweise die Farbwerte X , Y , Z des Normalvalenzsystems (DIN 5033) sind. Der Farbvektor \vec{F} kann sich nun innerhalb eines bestimmten Elementes des Farbraumes bewegen, ohne daß dies einen Einfluß auf die Farbempfindung des Menschen hätte (vgl. obiges Gedankenexperiment). Die Ursache für das Vorhandensein derartiger Raumelemente ist das begrenzte spektrale Auflösungsvermögen des menschlichen Auges. Zu jedem Punkt des Farbraumes gehört ein Raumelement konstanter Farbempfindung. Größe und Form der Raumelemente sind von ihrer Lage im Farbraum abhängig.

Mac Adam [25] sowie Moon und Spencer [26] haben über die Veränderung von Größe und Form der Elemente gleicher Farbempfindung in Abhängigkeit von ihrer Lage im Farbraum des CIE-Systems (DIN 5033) Untersuchungen durchgeführt. Mac Adam wählte 25 Punkte in der Farbtabelle (vgl. DIN 5033, Blatt 3) bei der Normlichtart C aus. Die in der Nachbarschaft dieser Punkte liegenden Farben wurden von mehreren Beobachtern mit der jeweiligen Ausgangsfarbe verglichen. Die Standardabweichungen der gerade noch erkennbaren Farbunterschiede ergaben, in die Farbtabelle eingetragen, eine Ellipse. Moon und Spencer übertrugen die Messungen von Mac Adam auf den Farbraum. Dort entsteht ein

Ellipsoid, dessen Oberfläche die Grenze für die gerade noch erkennbaren Farbunterschiede darstellt. Bei diesen Untersuchungen blieb der Einfluß der Farbreize des Umfeldes auf Form, Größe und Lage der Raumelemente unberücksichtigt. Er wird auch bei den folgenden Betrachtungen außer acht gelassen. Ein Hinweis auf diese Arbeiten findet sich auch bei Meyer-Eppler [27].

Da sich das spektrale Auflösungsvermögen des menschlichen Auges und damit auch die Größe der Elemente des Farbraumes kontinuierlich ändern, wäre eigentlich auch eine kontinuierliche (analoge) Betrachtungsweise (s.z.B.[28]) erforderlich. Da die nötigen Gleichungen in der Drucktechnik größtenteils fehlen, die Zusammenhänge zwischen den Größen entweder in graphischer oder in numerischer Form gegeben sind, soll hier bei der Berechnung des Informationsgehaltes eines Bildes eine diskrete (digitale) Betrachtungsweise angewandt werden. Diese führt zu einer Unterteilung des Farbraumes in kleine aneinanderliegende Zellen, deren Form und Größe durch das spektrale Auflösungsvermögen des Auges bei Vorhandensein des Farbreizes im Mittelpunkt einer Zelle gegeben sind. Im CIE-Farbraum ersetzen diese Zellen die Ellipsoide der einzelnen Mittelpunktsfarbreize.

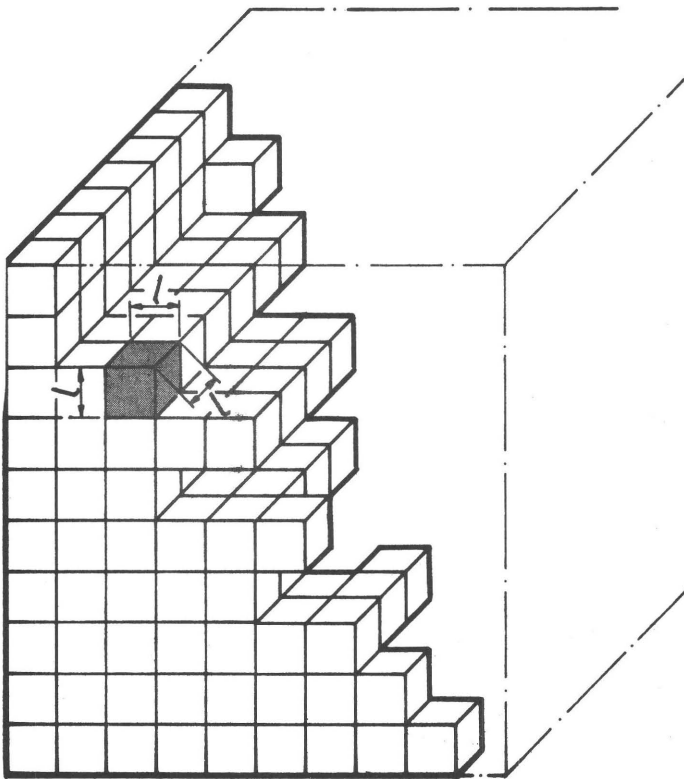


Bild 16: Aufteilung des Farbraumes nach Moon und Spencer in Raumelemente konstanter Farbempfindung

Moon und Spencer [26] geben Transformationsgleichungen an, die den Farbraum des Normvalenzsystems (DIN 5033) so verwandeln, daß zu jeder beliebigen Farbe ein kugelförmiges Raumelement konstanten Farbempfindens mit dem Durchmesser $D = 1$ gehört. Für die diskontinuierliche Betrachtung bedeutet dies eine Unterteilung des transformierten Farbraumes in gleich große Quader mit der Kantenlänge l (Bild 16).

Um den Fehler bei der diskreten Betrachtungsweise vernachlässigbar klein zu machen, müssen die Quader innerhalb der Kugel liegen.

Für den Fall, daß sich die Eckpunkte der Quader auf der Oberfläche der Kugel befinden, berechnet sich die Kantenlänge l nach der Gleichung

$$l = \frac{1}{3} \sqrt{3} \cdot D$$

Für den nach Moon und Spencer transformierten Farbraum gilt $D = 1$ und somit

$$l = \frac{1}{3} \sqrt{3} \cong 0,578$$

4.2.2 Berechnung des Informationsgehaltes eines Bildes

Bei der Erläuterung einiger informationstheoretischer Begriffe im Abschnitt 4.1 wurde die Gleichung für den (mittleren) Informationsgehalt $H(x)$ pro Ereignis x_i angegeben. Er entsteht, falls n verschiedene Ereignisse x_i mit der Wahrscheinlichkeit $p(x_i)$ auftreten.

$$\text{Es gilt: } H(x) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \cdot \lg p(x_i) \quad \text{bit/Ereignis}$$

Da es sich hier um Einzelereignisse x_i handelt, gilt diese Gleichung bei der hier angewandten diskreten Betrachtungsweise. Zur Berechnung des Informationsgehaltes eines Bildes werden die einzelnen von den Bildelementen ausgehenden Farbreize den Elementen des Farbraumes zugeordnet. Das Ereignis x_i ist demnach das Auftreten irgendeines dieser durch das Auflösvermögen des Auges gegebenen Raumelemente in irgendeinem Bildelement.

Ist \vec{F}_i der Farbvektor des Mittelpunktes eines Raumelementes, so wird $p(\vec{F}_i)$ gleich der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dieses Vektors bzw. des zugehörigen Raumelementes auf der Bildfläche.

Der Informationsgehalt eines Bildelementes errechnet sich zu

$$H = - \sum_{i=1}^{zf} p(\vec{F}_i) \cdot \lg p(\vec{F}_i) \quad \text{bit/Bildelement} \quad (1.1)$$

Da immer nur ein resultierender Farbreiz \vec{F}_i (bzw. nur ein Raumelement) pro Bildelement auftritt, kann für die Einheit des Informationsgehaltes H statt bit/Farbreiz (Raumelement) auch bit/Bildelement geschrieben werden.

Summiert wird in der Gleichung für H über alle auf der Bildfläche auftretenden Raumelemente. Die Zahl dieser Raumelemente ist z_f . Da sich im allgemeinen die Farbvektoren von mehr als einem Bildelement einem bestimmten Element des Farbraumes zuordnen lassen, ist z_f meistens kleiner als die Zahl der Bildelemente.

Gemäß dem Gesetz der großen Zahlen kann die Wahrscheinlichkeit $p(\vec{F}_i)$ in erster Näherung der relativen Häufigkeit für das Auftreten des Ereignisses \vec{F}_i , hier eines bestimmten Farbraumelementes gleichgesetzt werden.

Zur Ermittlung der verschiedenen $p(\vec{F}_i)$ werden die Farbvektoren der einzelnen Bildelemente bestimmt und anschließend den entsprechenden Elementen des Farbraumes zugeteilt. Die Zahl der auf ein Raumelement fallenden Bildelemente geteilt durch die Anzahl aller Bildelemente ergibt die relative Häufigkeit bzw. die Wahrscheinlichkeit $p(\vec{F}_i)$ für das Auftreten des betreffenden Farbraumelementes auf der Bildfläche.

Das Maximum H_{\max} des Informationsgehaltes tritt auf, wenn jedes Farbraumelement mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftritt. In diesem Fall gilt bei z_f Farbraumelementen wegen

$$\sum_{i=1}^{z_f} p(\vec{F}_i) = 1 \quad \text{die Beziehung} \quad p(\vec{F}_i) = \frac{1}{z_f}$$

Wird dieses $p(\vec{F}_i)$ in die Gleichung 1.1 eingesetzt, so errechnet sich H_{\max} zu:

$$\begin{aligned} H_{\max} &= - \sum_{i=1}^{z_f} \frac{1}{z_f} \lg \frac{1}{z_f} \\ H_{\max} &= - \frac{z_f}{z_f} \lg \frac{1}{z_f} = \lg z_f \\ H_{\max} &= \lg z_f \text{ bit/Bildelement} \end{aligned} \quad (1.2)$$

H_{\max} wird Entscheidungsgehalt genannt.

Eine andere Bezeichnungsweise nennt den nach Gleichung 1.1 errechneten Zahlenwert den Entscheidungsgehalt eines Bildes. Dies geschieht im Hinblick darauf, daß zur Übertragung der Bildelemente u.U. im Mittel weniger als H bit pro Bildelement erforderlich sind. Dies ist der Fall, wenn beispielsweise immer Bilder gleicher Motivart übertragen werden. Handelt es sich z.B. um Portraits nach der Art von Bild 17, so ist bekannt, daß eine Vielzahl von Zeilen mit 5 Bildelementen gleicher Farbe beginnen. Hier kann man zunächst die Information für die Farbe (das Farbraumelement) übertragen und dann die Zahl 5, die angibt, wie oft das Bildelement mit der speziellen Farbe hintereinander auftritt. Die Gesamtinformation ist hierbei geringer, als wenn jedesmal die Information für die gleiche Farbe erneut übertragen werden müßte. In diesem Sinne enthält

$$H = - \sum_{i=1}^{z_f} p(\vec{F}_i) \lg p(\vec{F}_i)$$

noch Redundanz und kann daher mit Entscheidungsgehalt bezeichnet werden. In der vorliegenden Arbeit interessiert weniger die Art und Weise der Bildübertragung, sondern in erster Linie die Übertragungsgüte, die durch Vergleich von Reproduktion und Vorlage beurteilt wird. Dabei werden paarweise einander zugeordnete Bildelemente von Reproduktion und Vorlage miteinander verglichen. Es interessiert der Detailreichtum des betrachteten Bildes. Dieser wird jedoch zahlenmäßig durch H ausgedrückt. Die Redundanz $H_r = H_{\max} - H$ ist dann ein Maß für den Unterschied zwischen dem im vorliegenden Fall maximal möglichen Detailreichtum und dem tatsächlich im Bild enthaltenen. In diesem Sinne ist H nach Gleichung 1.1 frei von Redundanz und soll daher in der vorliegenden Arbeit Informationsgehalt und nicht Entscheidungsgehalt genannt werden.

Der Informationsgehalt H nach Gleichung 1.1 ist offensichtlich ein Maß für den Detailreichtum eines Bildes. Dies wird bei der Betrachtung zweier Grenzfälle deutlich:

1. Maximaler Detailreichtum

In diesem Fall besitzt jedes Bildelement der Bildfläche einen anderen Farbreiz. Damit wird die Zahl z_f der Farbraumelemente gleich N , der Zahl der Bildelemente. Wegen der dann vorhandenen Gleichverteilung der Farbraumelemente gilt für die Wahrscheinlichkeit $p(\vec{F}_i)$

$$p(\vec{F}_i) = \frac{1}{z_f} = \frac{1}{N}$$

Damit wird nach Gleichung (1.2) $H = H_{\max} = \lg z_f = \lg N$

Maximaler Detailreichtum bedeutet gleichzeitig maximaler Informationsgehalt.

2. Keine unterscheidbaren Details

Jedes Bildelement besitzt die gleiche Farbe (ideale Volltonfläche). Es existiert somit nur ein einziges Farbraumelement, das in den einzelnen Bildelementen der Bildfläche mit Sicherheit, also mit der Wahrscheinlichkeit $p(\vec{F}_i) = 1$ auftritt.

Damit wird $H = 0$.

Falls keine Details auf einer Bildfläche zu beobachten sind, wird der Informationsgehalt H gleich Null.

Als Beispiel soll der Informationsgehalt H pro Bildelement eines Schwarzweißbildes gerechnet werden. Dieses Beispiel findet sich bei Neidhardt [29]. Beim Schwarzweißbild kann an die Stelle des Elementes des Farbraumes einfach eine empfindungsgerechte Helligkeitsstufe treten.

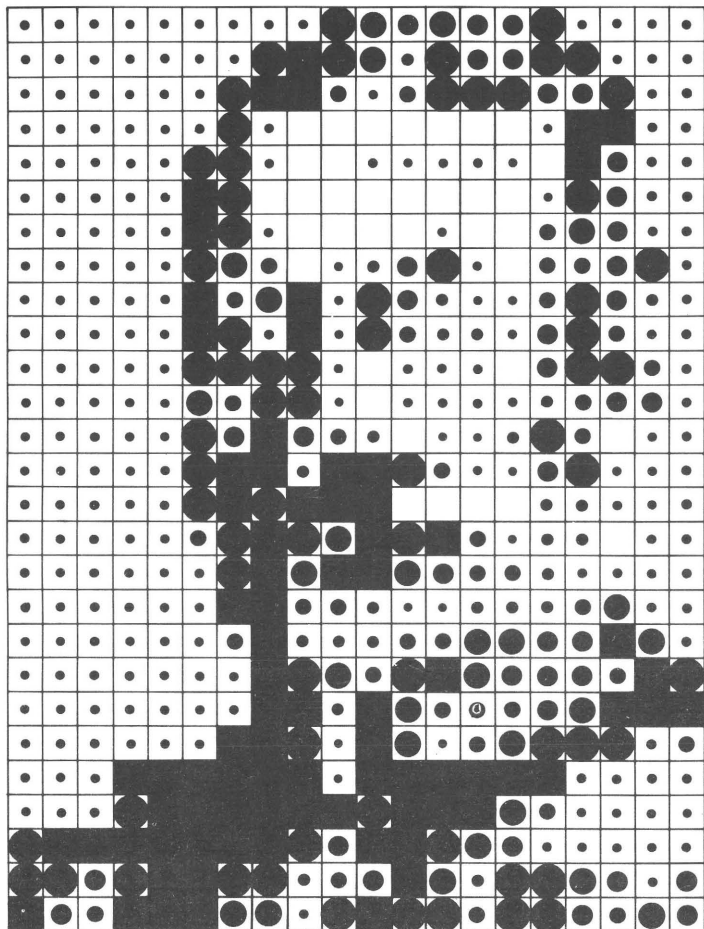


Bild 17: Aufteilung der Abbildung eines Männerkopfes in Bildelemente unterschiedlicher Helligkeitsstufen



1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	5	4	5	4	4	6	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	6	7	6	5	2	6	4	4	6	6	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	6	7	7	3	1	3	6	6	6	4	4	6	1	1	1
1	1	1	1	1	1	6	1	0	0	0	0	0	0	0	1	7	7	1	1	1
1	1	1	1	1	6	6	1	0	0	1	1	1	1	1	0	7	4	1	1	1
1	1	1	1	1	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	4	1	1	1
1	1	1	1	1	7	6	1	0	0	0	0	1	0	0	3	5	4	1	1	1
1	1	1	1	1	6	5	3	0	1	2	4	6	1	0	3	3	4	6	1	1
1	1	1	1	1	7	3	5	7	1	6	4	2	1	1	3	6	4	2	1	1
1	1	1	1	1	7	6	1	7	1	6	3	2	2	1	4	6	3	1	1	1
1	1	1	1	1	6	6	6	6	1	0	1	1	1	0	4	6	6	3	1	1
1	1	1	1	1	5	3	6	6	1	0	1	1	1	1	2	3	4	4	1	1
1	1	1	1	1	6	4	7	4	3	2	0	1	1	2	6	3	0	1	1	1
1	1	1	1	1	6	7	7	2	7	7	6	3	1	1	4	6	1	1	1	1
1	1	1	1	1	6	7	6	7	7	7	0	0	0	0	2	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	3	6	7	6	5	7	6	7	3	1	2	2	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	6	7	5	7	7	5	4	3	3	2	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	7	7	3	3	2	1	1	2	2	2	3	5	1	1	1
1	1	1	1	1	1	3	7	2	2	2	3	3	5	5	4	4	7	5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	7	6	5	3	6	7	5	4	4	4	3	7	6	1
1	1	1	1	1	1	1	7	7	2	7	5	3	3	3	4	5	7	7	7	1
1	1	1	1	1	1	7	7	6	1	7	5	1	3	5	6	6	6	1	3	1
1	1	1	7	7	7	7	7	7	1	7	7	7	7	7	7	1	1	1	1	1
1	1	1	6	7	7	7	7	7	7	6	7	7	7	5	3	1	1	1	1	1
6	7	7	7	7	7	7	7	6	4	7	7	6	5	4	1	1	1	1	1	1
6	6	4	6	7	7	6	6	2	3	4	7	5	2	6	6	5	4	1	4	4
7	4	3	7	7	7	5	5	1	6	7	6	6	3	6	6	4	3	5	4	4

Bild 18: Angabe der Nummer der Helligkeitsstufen in den einzelnen Bildelementen von Bild 17

Bild 17 zeigt die Zerlegung der Bildfläche in einzelne Bildelemente. Bei der kleinen Abbildung entspricht die Größe eines Bildelementes der Rasterlinienzahl $r_z = 24$ Linien (Bildelemente) pro cm.

Bild 18 gibt die zugehörigen Helligkeitsstufen an.

Die Tabelle zeigt die Auswertung des Bildes 18. Die Wahrscheinlichkeit $p(v)$ stimmt dabei mit der relativen Häufigkeit der zugehörigen Helligkeitsstufe V überein.

Helligkeitsstufe	Zahl des Auftretens (Häufigkeit)	relative Häufigkeit $p(v)$ (Wahrscheinlichkeit)	$-\lg p(v)$	$-p(v) \lg p(v)$
0	36	0,0667	3,9062	0,26054
1	227	0,4205	1,2498	0,52555
2	25	0,0463	4,4328	0,20524
3	36	0,0667	3,9062	0,26054
4	37	0,0685	3,8677	0,26494
5	26	0,0481	4,3778	0,21057
6	69	0,1279	2,9669	0,37947
7	84	0,1553	2,6869	0,41727
Summe	540	1,0000	$H = - \sum_{v=0}^7 p(v) \lg p(v) = 2,52412$	

Setzt man die Werte $p(v)$ in die Gleichung

$$H = - \sum_{v=0}^7 p(v) \lg p(v) \quad \text{ein,}$$

so ergibt sich

$$H = 2,524 \quad \text{bit/Bildelement,}$$

d.h. im vorliegenden Bildmotiv sind bei jedem Bildelement im Mittel 2,524 Ja-Nein-Entscheidungen nötig, um aus den acht möglichen Helligkeitsstufen eine bestimmte auswählen zu können.

Da insgesamt $z_v = 8$ Helligkeitsstufen unterscheidbar sind, ergibt sich im vorliegenden Beispiel ein Entscheidungsgehalt von

$$H_{\max} = \lg 8 = 3 \quad \text{bit/Bildelement.}$$

Die relative Redundanz r [30] des Bildes beträgt

$$r = \frac{H_{\max} - H}{H_{\max}} = \frac{3 - 2,524}{3} = 0,1586$$

oder $r = 15,86 \%$

Bisher wurde immer nur die Information H pro Bildelement betrachtet. Ist N die Zahl der Bildelemente einer Fläche F , so errechnet sich die gesamte Information H_F des Bildes nach der Beziehung

$$H_F = N \cdot H \quad \text{bit} \quad (2.1)$$

bzw. $H_{F\max} = N \cdot H_{\max} = N \cdot \lg z_f = \lg z_f^N \quad \text{bit} \quad (2.2)$

Im Beispiel ergibt sich

$$H_F = N \cdot H = 540 \cdot 2,524 = 1363 \text{ bit}$$

bzw. $H_{F\max} = N \cdot H_{\max} = 540 \cdot 3 = 1620 \text{ bit}$

In Gleichung 2.2 ist z_f^N gleichzeitig die Anzahl aller möglichen Bildmotive. Die Kombinationslehre spricht von einer Variation der z_f Möglichkeiten (möglichen Elemente des Farbraumes) zur N -ten Klasse [31]. Eine informationstheoretische Betrachtung, welche von der Gesamtheit aller möglichen Bildmotive ausgegangen wäre, hätte also zum gleichen Ausdruck für H_{\max} geführt. Hier zeigt sich, daß die Art und Weise der Betrachtung das Ergebnis nicht beeinflußt. Dies ist eine Voraussetzung für die sinnvolle Anwendung einer Theorie.

In die Gleichungen 2.1 und 2.2 läßt sich noch die Rasterlinienzahl r_z einführen.

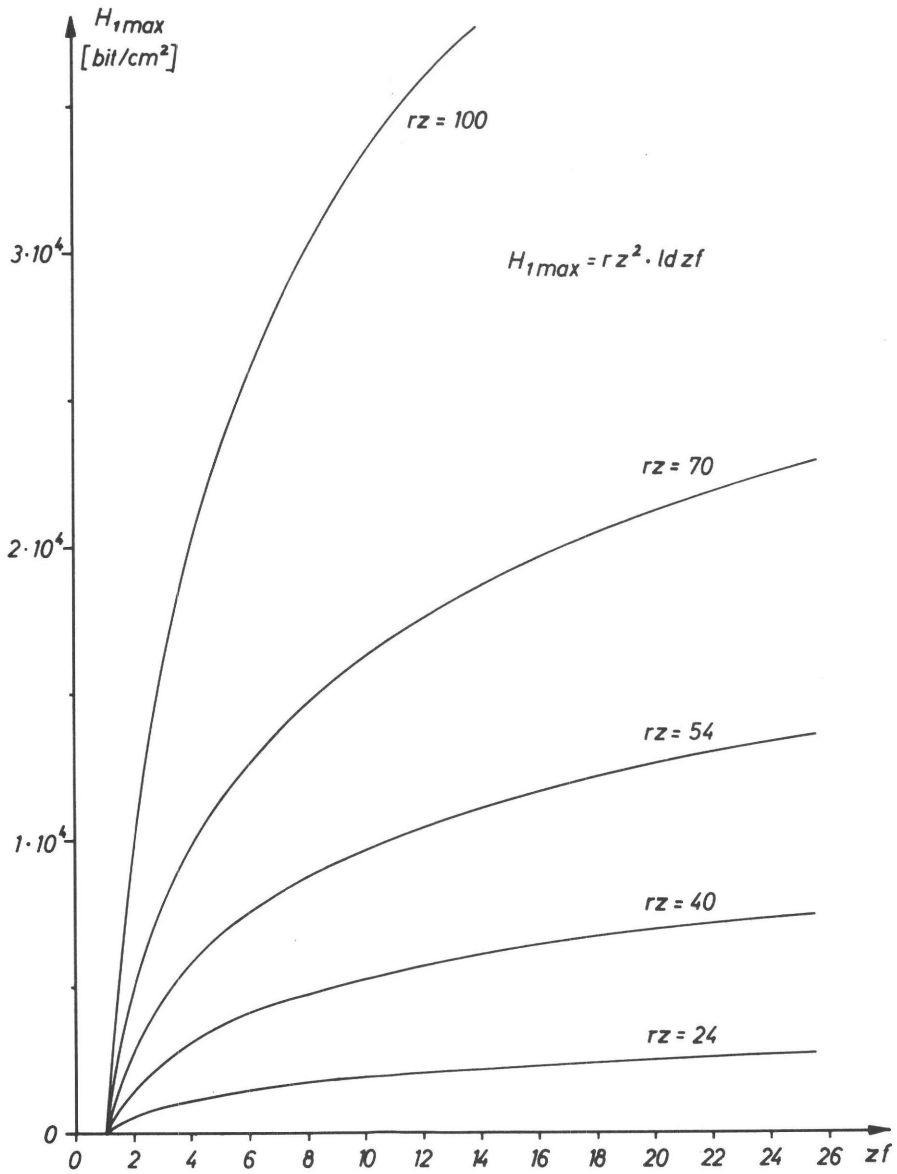


Bild 19: Die maximale Information H_{1max} als Funktion der Helligkeitsstufen.

$$\begin{array}{ll} \text{Mit} & N = rz^2 \cdot F \\ \text{gilt} & H_F = rz^2 \cdot F \cdot H \text{ bit} \end{array} \quad (2.3)$$

$$\text{bzw.} \quad H_{F\max} = rz^2 \cdot F \cdot \text{Id } zf \text{ bit} \quad (2.4)$$

Da die Fläche der Bilder häufig variiert, erscheint es sinnvoll, für Vergleichszwecke die gesamte Information eines Bildes auf seine Fläche F zu beziehen. Auf diese Weise entsteht H_1 , die Information pro Einheitsfläche.

$$H_1 = \frac{H_F}{F} = rz^2 \cdot H \quad \text{bit/cm}^2 \quad (3.1)$$

$$\text{bzw.} \quad H_{1\max} = \frac{H_{F\max}}{F} = rz^2 \cdot \text{Id } zf \quad \text{bit/cm}^2 \quad (3.2)$$

Der Verlauf der Funktion $H_{1\max} = rz^2 \text{Id } zf = H(zf)$ ist in Bild 19 dargestellt. Die Zahl zf der möglichen Farbraumelemente wird dabei auf die bei Schwarzweißdrucken denkbare Zahl der Helligkeitsstufen beschränkt.

Bei kleinen Stufenzahlen zf bewirkt eine Erhöhung von zf ein stärkeres Anwachsen der maximal möglichen Information pro Einheitsfläche als bei großen Stufenzahlen. Diese Steigerung von $H_{1\max}$ wächst mit zunehmender Rasterlinienzahl. Bei großen Stufenzahlen läßt sich der Informationsgehalt nur noch durch eine Vergrößerung von rz wesentlich erhöhen, soweit sich diese nicht aus anderen Gründen verbietet. Diese Aussage gilt sinngemäß auch für die einzelnen Druckfarben beim Mehrfarbendruck.

Nach Meyer-Eppler[32] wird die Gesamtzahl aller vom Auge unterscheidbaren Körperfarben auf $K = 1,5 \cdot 10^5$ bis $7,5 \cdot 10^6$ geschätzt, was einem Entscheidungsgehalt von

$$H_{\max K} = \text{Id } K \approx 17 \text{ bis } 23 \text{ bit/Bildelement}$$

entspricht.

Eine Bildfläche enthält N Bildelemente. Da jedes Bildelement nach Definition nur eine einzige Farbe besitzen soll, tritt der größte Entscheidungsgehalt dann auf, wenn jedes der Bildelemente eine unterschiedliche Farbe aufweist. In diesem Fall werden $zf = N$ Farbraumelemente auf der Bildfläche beobachtet. Der zugehörige größte Entscheidungsgehalt errechnet sich zu

$$H_{\max g} = \text{Id } N \text{ bit/Bildelement.}$$

Interessant ist nun die Antwort auf die Frage, bei welcher maximalen Bildfläche F_{\max} der Entscheidungsgehalt $H_{\max g}$ mit dem durch die maximale Zahl der Körperfarben gegebenen Entscheidungsgehalt $H_{\max K}$ übereinstimmt.

Wird die Bildfläche kleiner als F_{\max} , so können nicht mehr sämtliche unterscheidbaren Körperfarben gleichzeitig auf der Bildfläche dargestellt werden. Wird die Bildfläche größer als F_{\max} , so können jedoch auch nicht mehr als K Farben unterschieden werden.

Setzt man $H_{\max K}$ und $H_{\max g}$ einander gleich, so ergibt sich

$$H_{\max K} = H_{\max g}$$

bzw. $\text{Id } K = \text{Id } N$

oder $K = N$

Bekanntlich gilt $N = rz^2 \cdot F$ bzw. im vorliegenden Grenzfall $N = rz^2 \cdot F_{\max}$. Damit erhält man eine Beziehung für die maximale Bildfläche F_{\max} . Sie lautet

$$N = F_{\max} \cdot rz^2 = K$$

bzw.
$$F_{\max} = \frac{K}{rz^2}$$

Der Verlauf der Funktion $F_{\max} = F \left(\frac{1}{rz^2} \right)$ ist in Bild 20 dargestellt. Dabei wurde der Mittelwert $K = 3,8 \cdot 10^6$ gewählt. Ferner sind die DIN-Formate auf der Ordinate zur Veranschaulichung der Flächengrößen zusätzlich eingetragen.

Das unbewaffnete menschliche Auge kann bei normalem Sehabstand von 25 cm eine Fläche von etwa 10^{-2} mm^2 gerade noch auflösen (vgl. z.B. [33]). Diese minimale Fläche entspricht einer Rasterlinienzahl von $rz = 100$ Linien (Bildelemente)/cm. In diesem Grenzfall errechnet sich F_{\max} zu

$$F_{\max} = \frac{K}{rz^2} = \frac{3,8 \cdot 10^6}{100^2} = 3,8 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$$

$$F_{\max} = 380 \text{ cm}^2$$

Dieser Wert liegt etwas über dem Format DIN A 5.

Auf Bildflächen kleiner $F_{\max} = 380 \text{ cm}^2$ könnten somit nicht mehr sämtliche vom Auge unterscheidbaren Körperfarben gleichzeitig untergebracht werden, falls diese vom unbewaffneten Auge erkannt werden sollen.

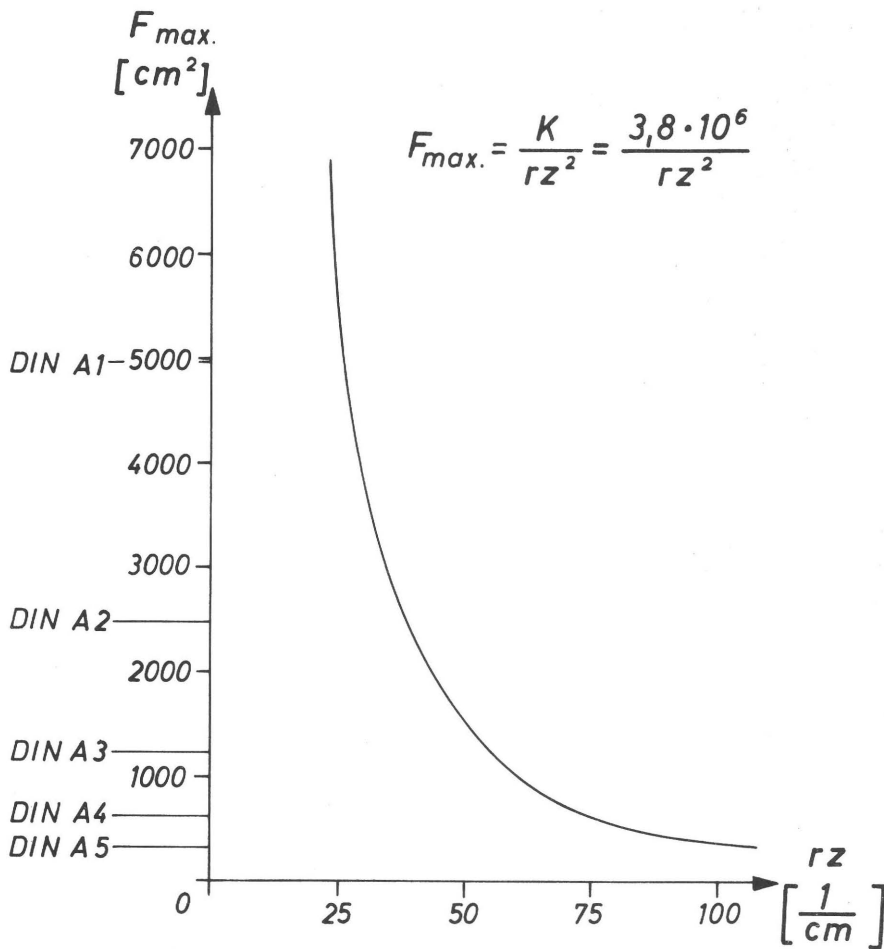


Bild 20: Die Bildfläche bei dem durch die Zahl der unterscheidbaren Körperfarben gegebenen Entscheidungsgehalt als Funktion der Rasterlinienzahl

4.2.3 Einrichtung zur Messung des Informationsgehaltes eines Bildes

Bild 21 zeigt das Schema der Meßeinrichtung. Sie dient im wesentlichen der Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten (=relativen Häufigkeiten) $p(\vec{F}_i)$ für das Auftreten der Elemente des Farbraumes in den einzelnen Bildelementen der Bildfläche.

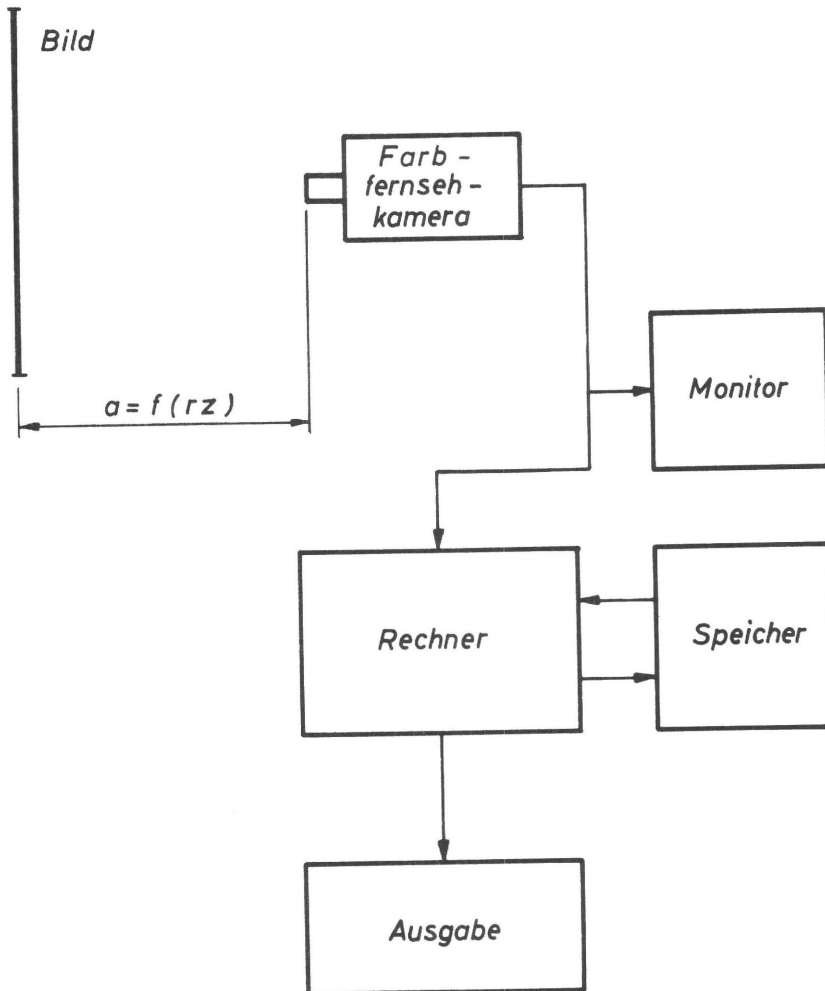


Bild 21: Schema einer Einrichtung zur Messung des Informationsgehaltes eines Bildes.

Ein Farbmeßgerät tastet die Bildfläche punktweise ab und mißt dabei den Farbart jedes einzelnen Bildelementes. Dies kann entweder — in z.Zt. zuverlässigster Weise — durch die Aufnahme der spektralen Remissionsfunktion $\beta(\lambda)$ (Spektralverfahren, s. DIN 5033 Blatt 4) oder ungenauer durch eine Farbzerlegung in drei Grundfarben (Dreibereichsverfahren, s. DIN 5033 Blatt 6) geschehen. Die zweite Methode hat den Nachteil, daß im Augenblick noch nicht realisierbare negative Bereiche der Funktion der spektralen Empfindlichkeiten der drei Empfangssysteme (Filter + optoelektrischer Meßwertumformer) erforderlich sind, um den gesamten Farbraum erfassen zu können. Vorteilhaft ist dagegen die größere Meßgeschwindigkeit. Bei der Messung des Farbortes nach dem Dreibereichsverfahren könnte das Farbmeßgerät beispielsweise eine Farbfernsehkamera sein, welche die Vorlage zeilenweise abtastet.

Vor der Messung wird der Abstand a zwischen Farbmeßgerät und Bildfläche so eingestellt, daß jedes Bildelement nur einmal abgetastet wird; a ist also eine Funktion der Rasterlinienzahl rz . Durch diese Einstellung des Beobachtungsabstandes wird die Größe des Bildelementes dem flächenhaften Auflösungsvermögen des Farbmeßgerätes und damit auch dem des menschlichen Auges angepaßt. Die Ausgangssignale des Farbmeßgerätes gelangen in einen Rechner, der bei Anwendung des Spektralverfahrens zunächst die Normfarbwerte X, Y, Z des betrachteten Bildelementes mit Hilfe der spektralen Remissionsfunktion $\beta(\lambda)$ errechnet. Anschließend stellt er fest, in welchem Farbraumelement die Spitze des gemessenen Farbvektors liegt. Dies kann z.B. dadurch geschehen, daß der Farbreiz mit Hilfe vorgegebener Transformationsgleichungen aus dem CIE-Farbraum in den Farbraum nach Moon und Spencer (Bild 16) übertragen wird. Die Normfarbwerte X, Y, Z gehen dabei z.B. in die Farbwerte R, S, T über. Da die durch das spektrale Auflösungsvermögen des Auges festgelegten Raumelemente im transformierten Raum durch gleich große Würfel von der Kantenlänge l dargestellt werden, ist die Zuordnung von Farbreiz und Raumelement besonders einfach.

Nach dem Abtasten des gesamten Bildes befinden sich auf den einzelnen Speicherplätzen Zahlen, die angeben, wie häufig die einzelnen Elemente des Farbraumes auf der Bildfläche vertreten sind. Diese Häufigkeiten gehen nun an den Rechner zurück, der die Wahrscheinlichkeiten $p(\vec{F}_i)$ und anschließend mit Hilfe der Beziehung

$$H = - \sum_{i=1}^{zf} p(\vec{F}_i) \cdot \lg p(\vec{F}_i)$$

den Informationsgehalt pro Bildelement ermittelt. Das Ergebnis erscheint schließlich in der Ausgabeeinheit.

Bei genügend hoher Meßgeschwindigkeit kann diese Meßanlage auch zeitliche Veränderungen des Informationsgehaltes erfassen (z.B. bei Trockenvorgängen).

Das vorgeschlagene Gerät weist für ein Positiv und für ein davon verlustlos gezogenes Negativ denselben Informationsgehalt aus. Das folgt aus der Definition des Informationsgehaltes, also aus Gleichung 1.1. Dasselbe gilt auch beim Vergleich eines seitenrichtigen

mit einem seitenverkehrten Bild. Der Informationsgehalt ist auch unabhängig von der Lage des Bildes.

Das menschliche Auge jedoch kann beim Betrachten eines negativen oder seitenverkehrten Bildes beim Vergleich mit der positiven bzw. seitenrichtigen Darstellung einen Informationsverlust empfinden. Der im vorliegenden Fall empfundene Verlust an Informationsinhalt hat rein physiologische Ursachen. Sobald nämlich der Betrachter gewohnt ist, die Bilder negativ bzw. seitenverkehrt anzusehen, wird auch seine Empfindung (empfangener Informationsinhalt) dieselbe sein wie beim Betrachten der positiven bzw. seitenrichtigen Darstellung (z.B. beim Betrachten eines Röntgenbildes, Auswerten eines negativen Filmes zur Photoanalyse eines kinematistischen Getriebes, Verstehen eines fremdsprachigen Textes nach dem Erlernen der Sprache). Sobald also, informationstheoretisch gesprochen, der Empfänger den Code der Signale erlernt hat, ist er auch in der Lage, den mit den Signalen übertragenen Informationsinhalt aufzunehmen. Es gibt Fälle, bei denen das Erlernen eines Code sehr schwierig ist, vor allem wenn zur Entzifferung der Signale hauptsächlich ein anderer Code verwendet wird. So können nur geübte Reprofachleute beim Betrachten von Bildern in „negativen“ Farben (Komplementärfarben) das Gleiche empfinden wie beim Betrachten der positiven Darstellung.

Derartige nur von der Kenntnis eines Code abhängigen Informationsverluste treten auch bei systembedingten zeitlichen und örtlichen Vertauschungen einzelner Bildelemente auf der Bildfläche auf.

Für die Drucktechnik haben die hier beschriebenen Verluste keine besondere Bedeutung, da von einer Vorlage im allgemeinen wieder eine positive, seitenrichtige Reproduktion hergestellt werden soll, und die Einhaltung der mit dieser Aufgabe verbundenen Forderung nach örtlicher und zeitlicher Korrelation der Bildelemente keine Schwierigkeiten bereitet. Aus diesen Gründen werden derartige Informationsverluste bei der vorliegenden Untersuchung außer acht gelassen.

4.2.4 Bemerkungen zum Unterschied zwischen dem Gehalt und dem Inhalt einer Information

Zu Beginn des Kapitels „Informationstheorie und Drucktechnik“ wurde dargelegt, daß Detailreichtum und Feinheit der Farbabstufung eines Bildes ihren empfindungsgerechten zahlenmäßigen Niederschlag im Informationsgehalt finden. Nun können jedoch bestimmte Bildpartien für den Betrachter eine Bedeutung haben, die nicht allein vom Detailreichtum bzw. der Häufigkeit der verschiedenen Bildelemente herrührt. So ist es beispielsweise wichtig, daß auf einer Landkarte keiner der vielen Punkte fehlt, welche die geographische Lage der Ortschaften festlegen. Dagegen wird in der Schummerung der Gebirge durchaus das eine oder andere Bildelement fehlen können, ohne daß die an den Betrachter übermittelte Information dadurch wesentlich geringer wäre. Bei gleicher relativer Häufigkeit der Ortspunkte und der Bildelemente der Schummerung liefern beide Punktgruppen den gleichen Beitrag zum Informationsgehalt des Bildes; in ihrem Anteil am Informationsinhalt unterscheiden sie sich dagegen sehr.

Das Beispiel zeigt, daß bei der Beurteilung der Druckqualität in einigen Fällen auch die an den Empfänger übermittelte Botschaft, also der Inhalt der Information eine Rolle spielen wird und zwar um so mehr, je stärker dieser Inhalt an einzelne Bildelemente gekoppelt ist. Informationstheoretisch betrachtet verringert sich hier die Redundanz pro Bildelement. Diese Koppelung zwischen Botschaft und Signal macht andererseits aber auch eine strenge Trennung zwischen Informationsinhalt und -gehalt unmöglich. Zur weiterführenden Darstellung des Unterschiedes zwischen dem Inhalt und dem Gehalt einer Information sei auf die Literatur verwiesen, insbesondere auf den Beitrag von Weaver in [19].

In der drucktechnischen Praxis wird für eine Vielzahl von Bildmotiven das einzelne Bildelement nur einen geringen Anteil an der Übertragung des Informationsinhaltes besitzen. Hier ist vor allem zu berücksichtigen, daß der Drucker die Bedeutung einzelner Bildpartien für den späteren Betrachter des Bildes häufig nicht kennt bzw. nicht kennen kann, da den verschiedenen Betrachtern je nach Bewertung der einzelnen Bildpartien unterschiedliche Nachrichten zugehen. Ist die Bedeutung einzelner Teile eines Bildmotives bekannt (z.B. Personengruppe im Vordergrund eines Bildes oder Warenartikel in einem Versandhauskatalog in einer dem Informationsinhalt nach irrelevanten Umgebung), so kann die informationstheoretische Betrachtung auf die interessanten Bildpartien beschränkt werden, um Gehalt und Inhalt der Information möglichst eng aneinander zu koppeln.

Ferner ist der Einfluß ausgesprochen psychologischer Momente bei der Beurteilung der Druckqualität denkbar. Eine Darstellung des Forum Romanum mit der Abendsonne im Hintergrund kann den einen Betrachter an die längst vergangene Größe des Römischen Reiches erinnern. Ist er romantisch veranlagt, so denkt er beim Anblick der Abendsonne sicherlich auch an den Spaziergang, der ihn zusammen mit einer reizenden Römerin vom Kapitol über das Forum Romanum zum Kolosseum führte. Dieser Betrachter ist so in das Bild vertieft, daß ihn die vielleicht etwas schlechte Druckqualität gar nicht stört. Der andere Betrachter, dem der Titel des Bildes nichts sagt, sieht nur eine Menge Ruinen und umgestürzter Säulen. Sein Urteil über die Druckqualität wird im wesentlichen von der korrekten Wiedergabe des Details, der Registerhaltigkeit, also letztlich vom Informationsgehalt geprägt sein.

Der Einfluß ausgesprochen psychologischer Beweggründe auf die Beurteilung der Druckqualität wird von Betrachter zu Betrachter u.U. recht stark variieren. Diese Schwankungen können vom Drucker praktisch nie berücksichtigt werden. Sie sollen es auch nicht, da die Druckprodukte für eine Vielzahl von Betrachtern mit unterschiedlichen Gemütsverfassungen hergestellt werden. Ausgesprochen psychologische Momente bei der Beurteilung eines Druckes können daher im allgemeinen ausgeklammert werden.

Die Ausführungen dieses Abschnittes zeigen, daß das einzelne Bildmotiv innerhalb einer bestimmten Motivgruppe einen sehr geringen Einfluß auf die Beurteilung der Druckqualität haben wird. Dies gilt für die Drucktechnik in einem besonderen Maße, da hier starke psychologische Einflüsse unberücksichtigt bleiben müssen. Den Drucker interessiert eben

vielmehr, wie ein Bild gedruckt ist und weniger, was es darstellt. Er möchte bei der Beurteilung eines Druckes in erster Linie Informationen über die Güte des Übertragungsprozesses erhalten. Das Bildmotiv ist dabei zweitrangig. Somit läßt sich feststellen, daß die Informationstheorie, welche durch die Beschränkung auf den Informationsgehalt den Inhalt a priori nicht berücksichtigt, durchaus geeignet ist, die Qualität von Reproduktionen und drucktechnischen Übertragungssystemen so zu beschreiben, wie sie vom Drucker und damit auch vom Durchschnittsbetrachter empfunden wird.

4.3 Weitere informationstheoretische Begriffe

4.3.1 Definitionen; das Bergersche Diagramm

Druckverfahren können als informationsverarbeitende Systeme betrachtet werden. Am Eingang eines solchen Systems liegt die Vorlage als Informationsträger, am Ausgang die fertige Reproduktion und dazwischen der Übertragungskanal, dargestellt durch das drucktechnische System. Bei der Weiterleitung der Information durch einen Übertragungskanal treten eine Reihe informationstheoretischer Größen auf, von denen bisher noch nicht die Rede war. Sie sollen im folgenden vorgestellt werden. Der Zusammenhang dieser neuen Informationsarten tritt im sog. Bergerschen Diagramm [11,34] anschaulich hervor (Bild 22).

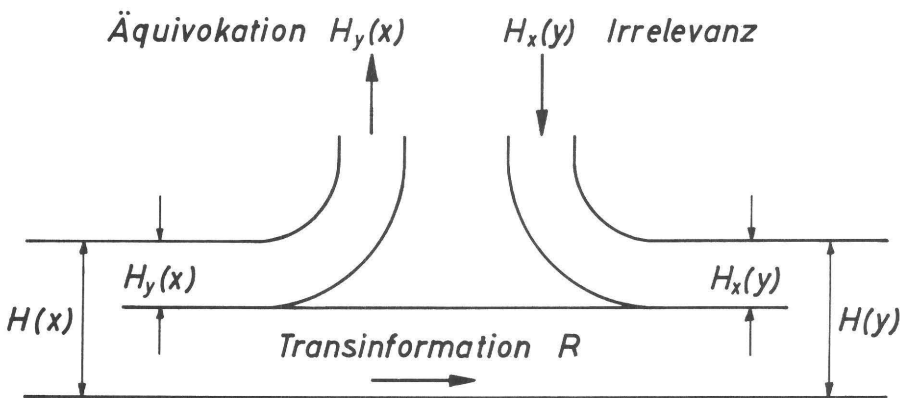


Bild 22: Das Bergersche Diagramm

Das Bergersche Diagramm

Das Diagramm enthält die folgenden Größen:

$H(x)$ ist der Informationsgehalt am Eingang des Übertragungskanales. Er errechnet sich nach der bereits bekannten Gleichung

$$H(x) = - \sum_i p(x_i) \cdot \lg p(x_i)$$

Hierin ist $p(x_i)$ die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses x_i am Eingang des Übertragungskanales.

In entsprechender Weise ist $H(y)$ der Informationsgehalt am Ausgang des Übertragungskanales. Es gilt

$$H(y) = - \sum_j p(y_j) \cdot \lg p(y_j)$$

mit der Wahrscheinlichkeit $p(y_j)$ für das Auftreten des Ereignisses y_j am Ausgang des Übertragungskanales.

Das Diagramm enthält ferner den Transinformationsgehalt R . Dies ist der relevante, am Ausgang des Übertragungskanales verfügbare Informationsgehalt. Er errechnet sich nach der Gleichung (andere Möglichkeiten siehe z.B. [34])

$$R = - \sum_i \sum_j p(x_i; y_j) \lg \frac{p(x_i) p(y_j)}{p(x_i; y_j)} \quad (4)$$

Diese Beziehung enthält die bisher noch unbekannte Größe $p(x_i; y_j)$. Dies ist die Wahrscheinlichkeit für das gemeinsame Auftreten der Ereignisse x_i und y_j am Ein- und Ausgang des Übertragungskanales. $p(x_i; y_j)$ errechnet sich zu (vergl. z.B. [34, 35])

$$p(x_i; y_j) = p(y_j) \cdot p_{y_j}(x_i) = p(x_i) \cdot p_{x_i}(y_j)$$

$p_{x_i}(y_j)$ ist die durch das Ereignis x_i bedingte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses y_j .

$p_{y_j}(x_i)$ ist die durch das Ereignis y_j bedingte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Ereignisses x_i .

Sind x_i und y_j Ereignisse am Ein- und Ausgang eines Übertragungskanales, so wird $p_{x_i}(y_j)$ Übergangswahrscheinlichkeit und $p_{y_j}(x_i)$ Rückschlußwahrscheinlichkeit genannt.

Manchmal werden auch die Gleichungen

$$p(x_i) = \sum_j p(x_i; y_j) \quad \text{u.} \quad p(y_j) = \sum_i p(x_i; y_j)$$

benötigt.

Nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit gilt außerdem

$$\sum_i p(x_i) = \sum_j p(y_j) = \sum_i \sum_j p(x_i; y_j) = \sum_i p_{y_j}(x_i) = \sum_j p_{x_i}(y_j) = 1$$

Die noch verbleibenden Größen des Bergerschen Diagrammes sind die Äquivokation $H_y(x)$ und die Irrelevanz $H_x(y)$. Die Äquivokation $H_y(x)$ ist derjenige Teil des Informa-

tionsgehaltes der Signale am Eingang des Übertragungskanales, der bei der Übertragung verloren geht. Dieser Anteil berechnet sich nach der Gleichung

$$H_Y(x) = - \sum_i \sum_j p(x_i; y_j) \cdot \text{Id } p_{Yj}(x_i) \quad (5.1)$$

Außerdem gilt
$$H_Y(x) = H(x) - R \quad (5.2)$$

(vergl. Bild 22)

Die Irrelevanz $H_X(y)$ ist derjenige Teil des Informationsgehaltes der Signale am Ausgang des Übertragungskanales, der bei der Übertragung neu hinzugekommen ist. Wird nur nach dem Informationsgehalt $H(x)$ am Eingang gefragt, so ist $H_X(y)$ irrelevante Information. Die Irrelevanz $H_X(y)$ berechnet sich nach der Gleichung

$$H_X(y) = - \sum_i \sum_j p(x_i; y_j) \cdot \text{Id } p_{Xi}(y_j) \quad (6.1)$$

Außerdem gilt
$$H_X(y) = H(y) - R \quad (6.2)$$

(vergl. Bild 22).

Der Transinformationsgehalt R ist von der Verteilung der Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$ am Eingang bzw. $p(y_j)$ am Ausgang sowie von den Übertragungseigenschaften des Kanales abhängig, die durch die Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{Xi}(y_j)$ bzw. durch die Rückschlußwahrscheinlichkeiten $p_{Yj}(x_i)$ gegeben sind. Das Maximum von R wird Symbolkapazität C , manchmal auch einfach Kanalkapazität genannt [36]. Diese Größe ist nur von den Übertragungseigenschaften des Kanales abhängig und daher ausschließlich eine Kenngröße des Übertragungskanales. Zur Berechnung von C siehe z.B. [37, 38].

4.3.2 Bestimmung der neu eingeführten informationstheoretischen Größen im Berger-schen Diagramm

Wie bereits früher in dem Abschnitt 4.2 über die Information eines Bildes gezeigt wurde, kann jeder von einem Bildelement ausgehende Farbreiz einem Farbraumelement zugeordnet werden, dessen Größe, Form und Lage durch das spektrale Auflösungsvermögen des menschlichen Auges festgelegt werden. Bei der hier angewandten digitalen Betrachtungsweise wird der gesamte Farbraum in einzelne Farbraumelemente aufgeteilt. Je nach Bildmotiv treten die einzelnen Farbraumelemente mit unterschiedlichen Häufigkeiten auf. Die relativen Häufigkeiten werden nach dem Gesetz der großen Zahlen mit den Wahrscheinlichkeiten $p(\vec{F})$ für das Auftreten der einzelnen Farbraumelemente auf der Bildfläche gleichgesetzt. Sind die Wahrscheinlichkeiten $p(\vec{F})$ für ein Bild z.B. durch eine Messung bekannt, so kann der Informationsgehalt des Bildes in bekannter Weise berech-

net werden. Zur Bestimmung der übrigen Größen des Bergerschen Diagramms werden die Farbräume von Reproduktion und Vorlage in die Betrachtung mit einbezogen.

Bild 23 zeigt die in einzelne Farbraumelemente aufgeteilten Farbräume der Vorlage und der Reproduktion in der bereits bekannten Darstellung nach Moon und Spencer. Die Wahrscheinlichkeiten $p(\vec{F})$ für das Auftreten der Farbraumelemente auf der Bildfläche werden zur Unterscheidung in Bild 23 und in den folgenden Ausführungen mit $p(x_i)$ für die Vorlage und mit $p(y_j)$ für die Reproduktion bezeichnet. Aus demselben Grund erhalten auch alle übrigen Rechengrößen die Kennzeichen x bzw. y . Die Zahl der auf einer Bildfläche auftretenden Farbraumelemente wurde früher mit z_f bezeichnet. Zur Unterscheidung sei im folgenden m die Zahl der Farbraumelemente auf der Vorlage und n die Zahl derjenigen auf der Reproduktion.

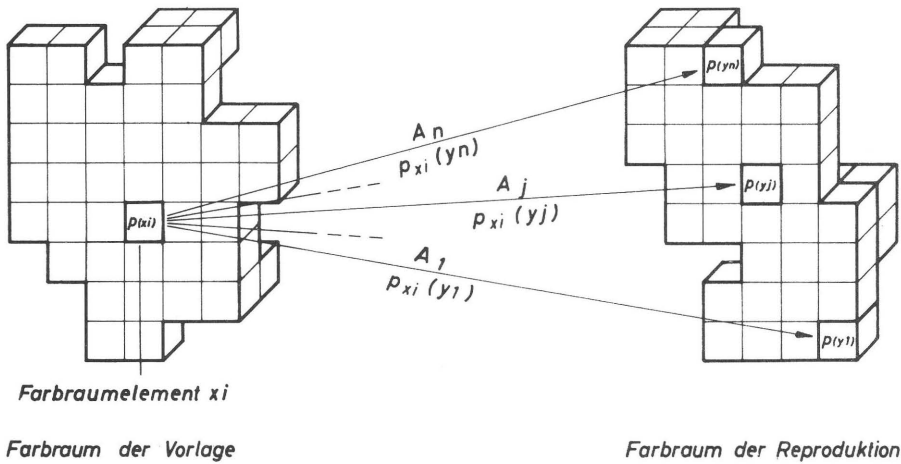


Bild 23: Zur Definition der Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{x_i}(y_j)$

Die Berechnung und Messung von $H(x)$ und $H(y)$ wurde bereits beschrieben. Es fehlt noch die Berechnung und Messung des Transinformationsgehaltes R sowie der Äquivokation $H_Y(x)$ und der Irrelevanz $H_X(y)$.

Die Transinformation R kann man nach Gleichung (4) berechnen. Es gilt

$$R = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(x_i; y_j) \lg \frac{p(x_i) p(y_j)}{p(x_i; y_j)} \quad \text{bit/Element} \quad (4)$$

Hierin sind

- $p(x_i)$ die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Farbraumelementes x_i auf der Vorlage
- $p(y_j)$ die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Farbraumelementes y_j auf der Reproduktion
- $p(x_i; y_j)$ die Wahrscheinlichkeit für das gemeinsame Auftreten der Farbraumelemente x_i und y_j in paarweise einander zugeordneten Bildelementen der Vorlage und der Reproduktion.

Summiert wird in der Gleichung für R über alle Farbraumelemente von Vorlage und Reproduktion. Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$ und $p(y_j)$ wurde bereits in den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3 über die Berechnung und Messung des Informationsgehaltes eines Bildes beschrieben.

Zur Berechnung von R fehlen noch die Wahrscheinlichkeiten $p(x_i; y_j)$. Nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit gilt

$$p(x_i; y_j) = p(x_i) \cdot p_{x_i}(y_j) \quad (7)$$

Unbekannt ist in dieser Gleichung die Übergangswahrscheinlichkeit $p_{x_i}(y_j)$. Sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Farbraumelement y_j bzw. der dazugehörige Farbreiz in einem beliebigen Bildelement der Reproduktion vorkommt, wenn im zugeordneten Bildelement der Vorlage das Farbraumelement x_i bzw. der dazugehörige Farbreiz erscheint.

Die Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{x_i}(y_j)$ geschieht im Prinzip wie folgt:

Zunächst werden die Bildelemente der Vorlage und der Reproduktion abgetastet. Dabei wird sichergestellt, daß die paarweise gegenseitige Zuordnung der Farbreize der Bildelemente von Vorlage und Reproduktion bzw. der entsprechenden Farbraumelemente erhalten bleibt. Nach dem Abtastvorgang stellt man beispielsweise fest, daß bei einem Auftreten des Farbraumelementes x_i auf der Bildfläche der Vorlage das Farbraumelement y_1 A_1 -mal, das Farbraumelement y_2 A_2 -mal, das Farbraumelement y_j A_j -mal usw. und schließlich das Farbraumelement y_n A_n -mal auf der Bildfläche der Reproduktion beobachtet werden kann (vergl. Bild 23).

Die Größe A_j ist also die Häufigkeit, mit der das Farbraumelement y_j auf der Bildfläche der Reproduktion auftritt, wenn im zugeordneten Bildelement der Bildfläche der Vorlage das Farbraumelement x_i erscheint.

Dieser Satz entspricht im wesentlichen der Definition der Übergangswahrscheinlichkeit $p_{x_i}(y_j)$. Diese kann in erster Näherung wieder mit einer relativen Häufigkeit gleichgesetzt

werden. Aus diesem Grunde müssen die Häufigkeiten A_j noch auf die Gesamtzahl der dem Farbraumelement x_i zugeordneten Bildelemente der Reproduktion bezogen werden. Diese Zahl stimmt mit der Häufigkeit des Farbraumelementes x_i auf der Bildfläche der Vorlage überein, da jedem Bildelement der Vorlage nur ein einziges auf der Reproduktion zugeordnet ist.

Somit ergibt sich

$$p_{xi}(y_j) = \frac{A_j}{p(x_i) \cdot N_x} \quad (8.1)$$

In dieser Gleichung ist N_x die Zahl der Bildelemente der Vorlage und $p(x_i) \cdot N_x$ die Häufigkeit des Farbraumelementes x_i .

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge soll das im Abschnitt 4.2.2 angegebene Beispiel eines Schwarzweißbildes (Bild 17) weitergeführt werden.

Es besteht die Aufgabe, eine Vorlage zu reproduzieren und die bei diesem Übertragungsprozeß auftretenden informationstheoretischen Größen des Bergerschen Diagramms zu berechnen.

Als Vorlage dient der in Bild 17 dargestellte Männerkopf. Die in Bild 18 aufgeführten Nummern der Helligkeitsstufen in den einzelnen Bildelementen von Bild 17 kennzeichnen die Ausgangssituation. Nun wurde eine Reproduktion von Bild 17 hergestellt. Hierzu ließ man für jedes der 540 Bildelemente der Vorlage den Zufall entscheiden, welche Helligkeitsstufe das zugehörige Bildelement in der Reproduktion besitzen soll. Es wurde für jedes der 540 Bildelemente einmal gewürfelt und die Nummer der Helligkeitsstufe des jeweiligen Bildelementes in Bild 18 in Abhängigkeit der gewürfelten Augenzahl um eins erhöht, gleich gelassen oder um eins erniedrigt. Auf diese Weise entstand Bild 25, das die Nummern der Helligkeitsstufen in den einzelnen Bildelementen der durch Würfeln gewonnenen Reproduktion enthält. Da jeder Nummer eine bestimmte Helligkeitsstufe zugeordnet ist, konnte Bild 24, die Reproduktion von Bild 17, gezeichnet werden. Die kleine Abbildung stellt wie bei Bild 17 eine Verkleinerung des großen Bildes dar. Bei der kleinen Darstellung des reproduzierten Männerkopfes entspricht die Größe eines Bildelementes wie bei der Vorlage der Rasterlinienzahl $r_z = 24$ Linien (Bildelemente) pro cm. Der hier beschriebene Reproduktionsprozeß war notwendig, da noch kein Gerät zur Verfügung steht, das die in der Rechnung benötigten Wahrscheinlichkeiten hätte messen können. Drucktechnisch gesehen wurde die Reproduktion in einem Verfahren hergestellt, dessen Übertragungskennlinie eine durch den Ursprung unter 45° Steigungswinkel verlaufende Gerade ist, wobei ein Streubereich von \pm eine Helligkeitsstufe zugelassen wurde. Die Übertragungseigenschaften des gedachten Druckverfahrens stimmen mit den Zufallseigenschaften des Würfels überein. Der Würfel stellt ein Modell eines Druckverfahrens dar, das die eben beschriebenen Übertragungseigenschaften besitzt. Da die in Bild 24 dargestellte kleine Abbildung durchaus als eine Reproduktion angesehen werden kann, die mittels eines der in der Drucktechnik üblichen Verfahren hergestellt wurde, kann man folgern, daß es möglich sein muß, Druckverfahren in Modellen zu simulieren. Diese

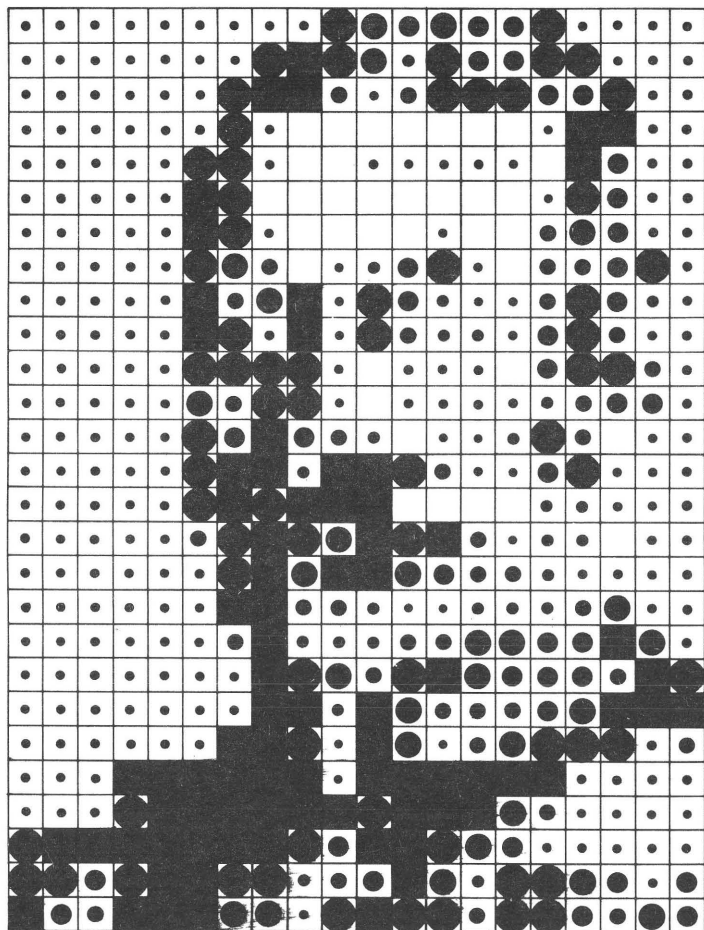


Bild 17: Aufteilung der Abbildung eines Männerkopfes in Bildelemente unterschiedlicher Helligkeitsstufen

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	5	4	5	4	4	6	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	6	7	6	5	2	6	4	4	6	6	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	6	7	7	3	1	3	6	6	6	4	4	6	1	1	1
1	1	1	1	1	1	6	1	0	0	0	0	0	0	0	1	7	7	1	1	1
1	1	1	1	1	6	6	1	0	0	1	1	1	1	1	0	7	4	1	1	1
1	1	1	1	1	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	4	1	1	1
1	1	1	1	1	7	6	1	0	0	0	0	1	0	0	3	5	4	1	1	1
1	1	1	1	1	6	5	3	0	1	2	4	6	1	0	3	3	4	6	1	1
1	1	1	1	1	7	3	5	7	1	6	4	2	1	1	3	6	4	2	1	1
1	1	1	1	1	7	6	1	7	1	6	3	2	2	1	4	6	3	1	1	1
1	1	1	1	1	6	6	6	6	1	0	1	1	1	0	4	6	6	3	1	1
1	1	1	1	1	5	3	6	6	1	0	1	1	1	1	2	3	4	4	1	1
1	1	1	1	1	6	4	7	4	3	2	0	1	1	2	6	3	0	1	1	1
1	1	1	1	1	6	7	7	2	7	7	6	3	1	1	4	6	1	1	1	1
1	1	1	1	1	6	7	6	7	7	7	0	0	0	0	2	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	3	6	7	6	5	7	6	7	3	1	2	2	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	6	7	5	7	7	5	4	3	3	2	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	7	7	3	3	2	1	1	2	2	2	3	5	1	1	1
1	1	1	1	1	1	3	7	2	2	2	3	3	5	5	4	4	7	5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	7	6	5	3	6	7	5	4	4	4	3	7	6	1
1	1	1	1	1	1	1	7	7	2	7	5	3	3	3	4	5	7	7	7	1
1	1	1	1	1	1	7	7	6	1	7	5	1	3	5	6	6	6	1	3	1
1	1	1	7	7	7	7	7	7	1	7	7	7	7	7	7	1	1	1	1	1
1	1	1	6	7	7	7	7	7	7	6	7	7	7	5	3	1	1	1	1	1
6	7	7	7	7	7	7	7	6	4	7	7	6	5	4	1	1	1	1	1	1
6	6	4	6	7	7	6	6	2	3	4	7	5	2	6	6	5	4	1	4	1
7	4	3	7	7	7	5	5	1	6	7	6	6	3	6	6	4	3	5	4	1

Bild 18: Angabe der Nummer der Helligkeitsstufen in den einzelnen Bildelementen von Bild 17

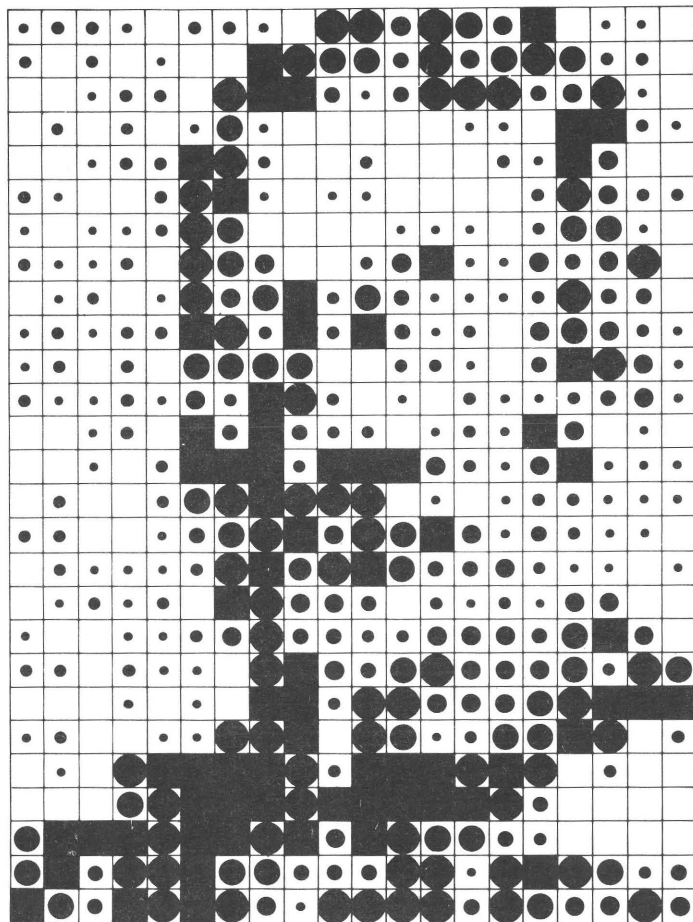


Bild 24: Aufteilung der Reproduktion des Männerkopfes aus Bild 17 in Bildelemente unterschiedlicher Helligkeitsstufen



1	2	2	1	0	2	2	1	0	6	6	4	6	5	4	7	0	1	1	0
2	0	2	0	1	0	0	7	6	5	5	3	6	4	5	6	5	2	2	0
0	0	1	2	2	0	6	7	7	3	1	3	6	6	6	3	4	6	1	0
0	2	0	2	0	1	5	1	0	0	0	0	0	1	1	0	7	7	2	1
0	0	1	2	2	7	6	2	0	0	2	0	0	0	2	1	7	4	0	0
2	1	0	0	2	6	7	1	0	1	1	0	0	0	0	2	6	4	2	2
1	0	1	1	2	6	5	0	0	0	0	1	1	1	0	2	5	5	1	0
2	1	1	2	0	6	5	4	0	0	2	4	7	1	1	4	3	4	6	0
0	1	2	0	1	6	4	5	7	2	5	3	1	1	1	2	6	3	3	0
1	2	1	2	2	7	6	2	7	2	7	3	1	2	0	4	5	4	2	1
1	2	0	2	0	5	5	5	5	0	0	2	2	1	0	3	7	6	4	1
2	1	1	2	1	4	2	7	6	2	0	1	0	2	1	1	2	3	4	1
0	0	1	2	0	7	3	7	3	2	2	0	1	2	1	7	4	0	1	0
0	0	1	0	2	7	7	7	2	7	7	7	4	2	1	4	7	1	1	1
0	2	0	0	2	5	6	7	6	6	6	0	1	0	1	2	2	1	1	1
2	2	0	0	1	3	5	6	7	4	6	5	7	4	1	3	2	1	1	0
0	2	1	1	1	2	6	7	4	6	7	5	3	3	4	2	1	1	0	1
0	1	2	1	2	0	7	6	4	4	3	0	2	1	2	1	4	4	0	0
1	0	0	1	1	2	4	6	3	3	2	3	4	4	4	3	5	7	4	0
2	2	0	2	1	1	0	6	7	4	3	5	6	4	4	4	5	2	6	5
0	0	0	1	0	1	0	7	7	2	6	6	4	4	4	5	6	7	7	7
1	2	0	0	1	1	6	6	7	0	6	5	1	2	5	5	7	6	0	2
0	1	0	6	7	7	7	7	6	2	7	7	7	6	7	6	0	2	0	0
0	0	0	5	6	7	7	7	6	7	7	7	7	7	6	3	0	0	0	0
5	7	7	7	6	7	7	6	7	4	7	6	5	5	3	2	0	0	0	0
5	7	3	6	6	7	5	5	3	3	5	6	6	1	6	7	6	5	2	3
7	5	3	7	6	7	6	4	1	6	6	6	6	3	6	5	4	4	6	4

Bild 25: Angabe der Nummer der Helligkeitsstufen in den einzelnen Bildelementen von Bild 24

Modelle können, wie das Beispiel des Würfels zeigt, von der Wirklichkeit beliebig stark abweichen, sie müssen nur die Übertragungseigenschaften der wirklichen Druckverfahren besitzen. Damit rückt auch das Simulieren von Druckverfahren in Rechenautomaten in den Bereich der realisierbaren Möglichkeiten, da zwischen dem Würfel und dem Computer in ihrer Funktion als Modell kein prinzipieller Unterschied besteht.

Zur Bestimmung der informationstheoretischen Größen des Bergerschen Diagramms benötigt man verschiedene Wahrscheinlichkeiten. Zunächst sollen die Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{xi}(y_j)$ nach Gleichung 8.1 bestimmt werden.

Diese lautet

$$p_{xi}(y_j) = \frac{A_j}{p(x_i) \cdot N_x}$$

Die Tabelle (S. 77) zeigt die Auswertung der Bilder 18 und 25. Dabei sind die beiden ersten Spalten mit denjenigen der Tabelle zu Bild 18 in Abschnitt 4.2.2 identisch. N_x , die Zahl der Bildelemente der Vorlage, beträgt 540. Die Häufigkeit A_j einer Helligkeitsstufe y_j in der Reproduktion, wenn im zugehörigen Bildelement der Vorlage die Helligkeitsstufe x_i auftritt, wurde durch Vergleich von Bild 25 mit Bild 18 ermittelt.

Die Tabelle läßt erkennen, wie die Häufigkeitsverteilung der Helligkeitsstufen in der Vorlage durch den Übertragungsprozeß verändert wird. Die Häufigkeiten A_j der Helligkeitsstufen y_j , die zu einer bestimmten Helligkeitsstufe x_i der Vorlage gehören, müssen aufsummiert wieder die Häufigkeit der Helligkeitsstufe x_i ergeben, die in Spalte zwei angeschrieben ist. Die letzte Spalte der Tabelle enthält die nach Gleichung 8.1 errechneten Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{xi}(y_j)$. Die Bedingung

$$\sum_{j=0}^7 p_{xi}(y_j) = 1$$

muß für jedes x_i erfüllt sein.

In der ersten Zeile der Tabelle steht beispielsweise der Zahlenwert $p_0(0) = 0.6667$. Dies bedeutet: Tritt in einem beliebigen Bildelement der Vorlage (Bild 17) die Helligkeitsstufe 0 auf, so erscheint — infolge der Eigenschaften des Übertragungsverfahrens — die Helligkeitsstufe 0 mit der Wahrscheinlichkeit 0.6667 im zugehörigen Bildelement der Reproduktion (Bild 24). Die in der Tabelle errechnete bedingte relative Häufigkeit wird wieder näherungsweise gleich der bedingten Wahrscheinlichkeit, im vorliegenden Fall gleich der Übergangswahrscheinlichkeit $p_{xi}(y_j)$ gesetzt.

Der besseren Übersicht wegen schreibt man die Übergangswahrscheinlichkeiten in einer Matrix auf (siehe Seite 78).

Helligkeitsstufe in der Vorlage	Häufigkeit von xi in der Vorlage	Helligkeitsstufe in der Reproduktion	Häufigkeit von yj, wenn im zugehörigen Bildelement der Vorlage die Helligkeitsstufe xi vorhanden ist	Übergangswahrscheinlichkeit
xi	p (xi) · N _x	yj	A _j	$p_{xi}(y_j) = \frac{A_j}{p(x_i) \cdot N_x}$
0	36	0	24	0,6667
		1	12 $\Sigma = 36$	0,3333 $\Sigma = 1.0000$
1	227	0	90	0.3965
		1	69	0.3040
		2	68 $\Sigma = 227$	0.2995 $\Sigma = 1.0000$
2	25	1	8	0.3200
		2	10	0.4000
		3	7 $\Sigma = 25$	0.2800 $\Sigma = 1.0000$
3	36	2	6	0.1667
		3	12	0.3333
		4	18 $\Sigma = 36$	0.5000 $\Sigma = 1.0000$
4	37	3	12	0.3243
		4	16	0.4324
		5	9 $\Sigma = 37$	0.2433 $\Sigma = 1.0000$
5	26	4	9	0.3461
		5	9	0.3461
		6	8 $\Sigma = 26$	0.3078 $\Sigma = 1.0000$
6	69	5	23	0.3333
		6	24	0.3478
		7	22 $\Sigma = 69$	0.3189 $\Sigma = 1.0000$
7	84	6	37	0.4405
		7	47 $\Sigma = 84$	0.5595 $\Sigma = 1.0000$

$$N_x = 540$$

$$N_y = N_x = 540$$

Matrix der Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{xi}(y_j)$

x_i	=	0	1	2	3	4	5	6	7
y_j	= 0	0.6667	0.3965						
	1	0.3333	0.3040	0.3200					
	2		0.2995	0.4000	0.1667				
	3			0.2800	0.3333	0.3243			
$p_{xi}(y_j)$	= 4				0.5000	0.4324	0.3461		
	5					0.2433	0.3461	0.3333	
	6						0.3078	0.3478	0.4405
	7							0.3189	0.5595

Man erkennt hier ebenfalls, daß die Bedingung

$$\sum_{j=0}^7 p_{xi}(y_j) = 1 \quad \text{erfüllt ist.}$$

Zur Berechnung der informationstheoretischen Größen des Bergerschen Diagrammes werden noch die Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$, $p(y_j)$ und $p(x_i; y_j)$ benötigt.

Der Tabelle zu Bild 18 in Abschnitt 4.2.2 kann man die Zeilenmatrix der Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$ entnehmen (Seite 79).

Die Wahrscheinlichkeiten $p(x_i; y_j)$ für das gemeinsame Auftreten zweier Helligkeitsstufen in einander zugeordneten Bildelementen von Vorlage und Reproduktion errechnen sich nach Gleichung (7) zu

$$p(x_i; y_j) = p(x_i) \cdot p_{xi}(y_j)$$

Es entsteht die Matrix der Wahrscheinlichkeiten $p(x_i; y_j)$ (Seite 79).

Die Wahrscheinlichkeiten $p(y_j)$ für das Auftreten der Helligkeitsstufen in der Reproduktion erhält man durch Aufsummieren der Zahlenwerte in den Zeilen der Matrix (Seite 79). Es gilt nämlich die Beziehung (vergl. Abschnitt 4.3.1)

$$p(y_j) = \sum_{i=0}^7 p(x_i; y_j)$$

Summiert man sämtliche Werte der Matrix auf, so ergibt sich

$$\sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 p(x_i; y_j) = 0.9997 \cong 1$$

Damit sind alle Vorarbeiten geleistet, um die informationstheoretischen Größen im Bergerschen Diagramm berechnen zu können.

Der Transinformationsgehalt R soll hier nach Gleichung (4) ermittelt werden. Es gilt

$$R = - \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 p(x_i; y_j) \cdot \lg \frac{p(x_i) \cdot p(y_j)}{p(x_i; y_j)}$$

Matrix der Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$

x_i	=	0	1	2	3	4	5	6	7
$p(x_i)$	=	0.0667	0.4205	0.0463	0.0667	0.0685	0.0481	0.1279	0.1553

Dabei gilt $\sum_{i=0}^7 p(x_i) = 1$

Matrix der Wahrscheinlichkeiten $p(x_i; y_j)$

x_i	=	0	1	2	3	4	5	6	7	$p(y_j)$
y_j	= 0	0.0445	0.1667							0.2112
	1	0.0222	0.1278	0.0148						0.1648
	2		0.1259	0.0185	0.0111					0.1555
	3			0.0130	0.0222	0.0222				0.0574
	4	$p(x_i; y_j) =$			0.0333	0.0296	0.0166			0.0795
	5					0.0167	0.0166	0.0426		0.0759
	6						0.0148	0.0445	0.0684	0.1277
	7							0.0408	0.0869	0.1277

$$\sum_{j=0}^7 p(y_j) = 0.9997 \approx 1$$

Setzt man die Wahrscheinlichkeiten in diese Beziehung ein, so erhält man

$$R = - \left[0,0445 \operatorname{ld} \frac{0,0667 \cdot 0,2112}{0,0445} + 0,0222 \operatorname{ld} \frac{0,0667 \cdot 0,1648}{0,0222} + \dots + 0,0869 \operatorname{ld} \frac{0,1553 \cdot 0,1277}{0,0869} \right]$$
$$R = 1,457 \quad \text{bit/Bildelement}$$

Der Informationsgehalt $H(x)$ der Vorlage (Bild 17) ergab sich zu (vergl. Abschnitt 4.2.2) $H(x) = 2,524$ bit/Bildelement.

Der Informationsgehalt $H(y)$ der Reproduktion (Bild 24) errechnet sich in analoger Weise nach der Beziehung

$$H(y) = - \sum_{j=0}^7 p(y_j) \cdot \operatorname{ld} p(y_j)$$

Die Rechnung ergibt $H(y) = 2,889$ bit/Bildelement.

Mit $H(x)$, $H(y)$ und R ist das Bergersche Diagramm vollständig bestimmt.

Die Äquivokation $H_Y(x)$ errechnet sich nach Gleichung 5.2 zu $H_Y(x) = H(x) - R = 2,524 - 1,457 = 1,067$ bit/Bildelement.

Die Irrelevanz $H_X(y)$ errechnet sich nach Gleichung 6.2 zu $H_X(y) = H(y) - R = 2,889 - 1,457 = 1,432$ bit/Bildelement.

Man hätte die Äquivokation und die Irrelevanz auch nach Gleichung 5.1 bzw. 6.1 bestimmen können. Zur Berechnung der Äquivokation nach Gleichung 5.1 sind die Rückschlußwahrscheinlichkeiten $p_{y_j}(x_i)$ erforderlich, die sich bei gegebenen $p(y_j)$ und $p(x_i; y_j)$ nach der Gleichung

$$p_{y_j}(x_i) = \frac{p(x_i; y_j)}{p(y_j)}$$

ermitteln lassen.

Damit erhält das Bergersche Diagramm im vorliegenden Beispiel die in Bild 26 gezeigte Gestalt.

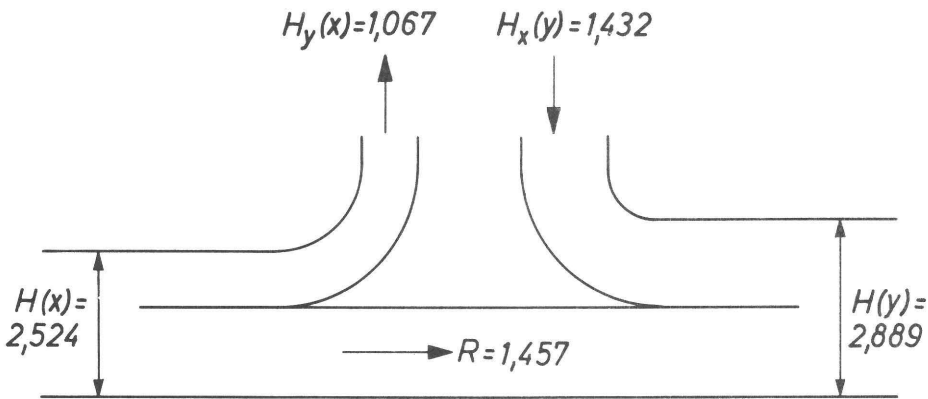


Bild 26:

Zur Bestimmung der neu eingeführten Größen im Bergerschen Diagramm kann ein Gerät verwendet werden, das im Prinzip den gleichen Aufbau besitzt, wie die zur Messung des Informationsgehaltes eines Bildes vorgeschlagene Meßeinrichtung. Unter Wahrung der paarweisen, gegenseitigen örtlichen Zuordnung der Bildelemente werden die Vorlage und die Reproduktion entweder nacheinander oder in einer anderen denkbaren Ausführung gleichzeitig unter das Farbmeßgerät gelegt. Dieses tastet die Bildelemente von Vorlage und Reproduktion in bekannter Weise zeilenweise ab und ermittelt die Wahrscheinlichkeiten (relative Häufigkeiten) $p(x_i)$ bzw. $p(y_j)$. Bei gegebener örtlicher Zuordnung der Bildelemente von Vorlage und Reproduktion mißt das Gerät ferner die Häufigkeiten A_j . Es stellt also fest, wie oft ein bestimmtes Farbraumelement der Reproduktion mit einem bestimmten Farbraumelement der Vorlage paarweise verknüpft wird. Die Messung der A_j kann entweder für alle x_i gleichzeitig in einem Abtastvorgang oder für jedes x_i gesondert in insgesamt m Abtastvorgängen erfolgen. Im ersten Fall ist der Speicherplatzbedarf m -mal größer als bei der zweiten Meßmethode, die im wesentlichen mit derjenigen zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten $p(y_j)$ übereinstimmt. Nach der Messung der A_j berechnet der Computer die Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{x_i}(y_j)$ nach Gleichung (8.1). Der höhere Rechenaufwand bei der Bestimmung der $p_{x_i}(y_j)$ für alle x_i gleichzeitig macht sich in einer kürzeren Rechenzeit bemerkbar. Die Wahrscheinlichkeiten $p(x_i; y_j)$ ergeben sich nach Gleichung (7).

Damit ist der Rechner in der Lage, die informationstheoretischen Größen im Bergerschen Diagramm zu bestimmen. Er berechnet beispielsweise zunächst die Informationsgehalte $H(x)$ und $H(y)$ von Vorlage und Reproduktion. Anschließend ermittelt der Rechner den Transinformationsgehalt R z. B. nach Gleichung (4). Dabei summiert er über alle Farbraumelemente von Vorlage und Reproduktion. Sind $H(x)$, $H(y)$ und R bekannt, so können Äquivokation und Irrelevanz nach Gleichung (5.2) bzw. (6.2) berechnet werden. Weitere Berechnungsmöglichkeiten ergeben sich aus dem Zusammenhang der informationstheoretischen Größen, wie er im Bergerschen Diagramm sichtbar wird.

An dieser Stelle sei vermerkt, daß neben Gleichung (7) auch die Beziehung

$$p(x_i; y_j) = p(y_j) \cdot p_{y_j}(x_i)$$

gilt (vergl. Abschnitt 4.3.1).

Auf die Drucktechnik übertragen ist $p_{y_j}(x_i)$ die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein bestimmtes Farbraumelement y_j der Reproduktion mit den verschiedenen Farbraumelementen x_i der Vorlage verknüpft wird. An die Stelle von Gleichung (8.1) tritt die folgende Beziehung für die sogenannte Rückschlußwahrscheinlichkeit $p_{y_j}(x_i)$ (Bild 27).

Es gilt

$$p_{y_j}(x_i) = \frac{A_i}{p(y_j) \cdot N_y} \quad (8.2)$$

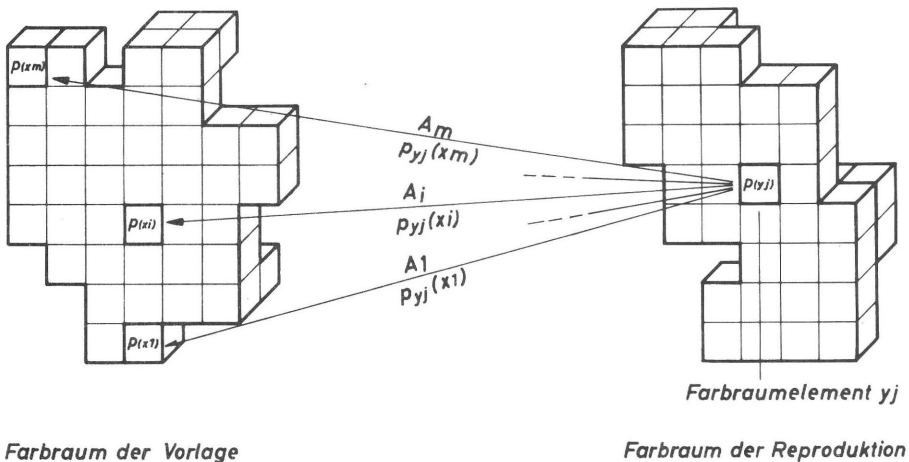


Bild 27: Zur Definition der Rückschlußwahrscheinlichkeiten $p_{y_j}(x_i)$

Hierin ist N_y die Zahl der Bildelemente der Reproduktion und $p(y_j) \cdot N_y$ die Häufigkeit des Farbelementes y_j .

Es existiert also noch eine zweite Betrachtungsweise, bei der im Gegensatz zu der bisher verwendeten die Reproduktion den Ausgangspunkt zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten $p(x_i; y_j)$ bildet. Diese zweite Betrachtungsweise ist der ersten völlig gleichwertig und führt auch zum selben Ergebnis für $p(x_i; y_j)$ und damit auch für die übrigen informationstheoretischen Größen im Bergerschen Diagramm.

4.3.3 Die drucktechnische Bedeutung der Äquivokation und der Irrelevanz

Für diese beiden Größen gelten die Beziehungen (vergl. Abschnitt 4.3.1)

$$\text{Äquivokation } H_Y(x) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(x_i; y_j) \cdot \text{Id } p_{Yj}(x_i) \quad (5.1)$$

$$\text{Irrelevanz } H_X(y) = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p(x_i; y_j) \cdot \text{Id } p_{Xi}(y_j) \quad (6.1)$$

Unter der Voraussetzung, daß $p(x_i)$ und $p(y_j)$ von Null verschieden, also Vorlage und Reproduktion überhaupt vorhanden sind, ergibt sich aus dem Aufbau der Gleichungen (5.1) und (6.1), daß die Äquivokation $H_Y(x)$ für $p_{Yj}(x_i) = 1$ und die Irrelevanz $H_X(y)$ für $p_{Xi}(y_j) = 1$ verschwinden. Diese Feststellung ist für die folgenden Überlegungen wichtig.

Zur Erläuterung der drucktechnischen Bedeutung von Äquivokation und Irrelevanz wird eine ideale Volltonfläche herangezogen. Von allen ihren Bildelementen geht der gleiche Farbreiz aus. Ihr wird daher nur ein einziges Farbraumelement zugeordnet, das mit der Wahrscheinlichkeit $p(x_i) = 1$ auftritt, so daß ihr Informationsgehalt zu Null wird.

Äquivokation (Informationsverlust)

Die drucktechnische Bedeutung dieses Begriffes wird in Bild 27 sichtbar. Auf der Vorlage sei eine gewisse Anzahl von Farben (Farbraumelementen) zu unterscheiden, so daß $0 < p(x_i) < 1$ gilt. In diesem Fall besitzt die Vorlage einen gewissen Informationsgehalt. Von dieser Vorlage wird nun eine Reproduktion hergestellt. Das dabei angewandte Druckverfahren habe zufälligerweise die Eigenschaft, sämtliche Details der Vorlage während der Übertragung zu verwischen, so daß als Reproduktion eine ideale Volltonfläche entsteht. Diese besitzt keinerlei für den menschlichen Beobachter unterscheidbare Merkmale; somit existiert auch nur ein einziges Farbraumelement auf der Bildfläche der Reproduktion (vergl. Bild 27). Damit wird $p(y_j) = 1$ und der Informationsgehalt $H(y)$ gleich Null.

Allgemein gilt:

$$p(x_i; y_j) = p(x_i) \cdot p_{Xi}(y_j) = p(y_j) \cdot p_{Yj}(x_i)$$

und

$$p(x_i) = \sum_{j=1}^n p(x_i; y_j)$$

im Beispiel der idealen Volltonfläche als Reproduktion ergibt sich mit $p(y_j) = p(y_1) = 1$

$$p(x_i; y_1) = p(x_i) \cdot p_{Xi}(y_1) = 1 \cdot p_{Y1}(x_i)$$

Da nur ein einziges Farbraumelement y_j auf der Bildfläche der Reproduktion existiert, wird

$$p(x_i) = \sum_{j=1}^1 p(x_i; y_j) = p(x_i; y_1)$$

Schließlich erhält man mit

$$p(x_i) = p(x_i) \cdot p_{x_i}(y_1) = 1 \cdot p_{y_1}(x_i)$$

die Ausdrücke

$$p_{y_1}(x_i) = p(x_i), \text{ wobei } p(x_i) < 1 \text{ ist}$$

und

$$p_{x_i}(y_1) = 1$$

Dieses Ergebnis kann auch unmittelbar aus Bild 27 entnommen werden.

Aus $p_{x_i}(y_1) = 1$ und $p_{y_1}(x_i) < 1$ folgt, daß im vorliegenden Beispiel keine Irrelevanz, also ausschließlich Äquivokation auftritt.

Wegen $p_{y_1}(x_i) = p(x_i)$ gilt $H_Y(x) = H(x)$, d.h. die Äquivokation (Informationsverlust) ist gleich dem Informationsgehalt der Vorlage.

Das Beispiel der Volltonfläche als Reproduktion, bei der keinerlei Irrelevanz auftritt, zeigt deutlich, daß die Äquivokation $H_Y(x)$ in der Drucktechnik ein Maß ist für die vom menschlichen Auge empfundene Verringerung des Detailreichtums der Reproduktion beim Vergleich mit der Vorlage.

Äquivokation, also eine Verkleinerung des Detailreichtums der Vorlage durch den Übertragungsprozeß, führt in jedem Falle auch zu einer Verfälschung der Farben in der Reproduktion. Diese Erscheinung kann jedoch auch bei verlustloser Übertragung, d.h. bei $H_Y(x) = 0$ auftreten. In diesem Fall sind die Wahrscheinlichkeiten $p_{y_j}(x_i) = 1$, so daß ein Farbraumelement y_j mit nur einem Farbraumelement x_i durch die paarweise einander zugeordneten Bildelemente von Reproduktion und Vorlage verbunden ist (vgl. im Gegensatz dazu die Darstellung in Bild 27). Identität der Farben würde zusätzlich bedeuten, daß die Lage der Farbraumelemente y_j und x_i im Farbraum identisch ist. Ist dies nicht der Fall, so tritt trotz $H_Y(x) = 0$ eine Farbverfälschung auf.

In der Drucktechnik treffen diese Überlegungen für folgende Fälle zu:

1. bei Farbretuschen, wenn hierdurch praktisch eine neue Vorlage entsteht (z.B. blauer Himmel soll in der Reproduktion rot erscheinen),

2. bei Vorlagen mit sehr wenigen unterscheidbaren Farbreizen (z.B. Komposition von Volltonflächen, z.B. Schachbrettmuster), wenn die Farben der Reproduktion im wesentlichen durch den Verlauf der Übertragungsfunktion des Druckverfahrens verfälscht werden.

Beide Fälle gehören in den Bereich der Farbmeterik. Sie gibt die Antwort auf die Frage, wie z.B. die Übertragungseigenschaften aussehen müssen, damit eine bestimmte Farbe auf der Vorlage auch wieder auf der Reproduktion erscheint. Es geht dabei weniger um die Frage nach der Güte des Übertragungsprozesses, sondern mehr um die richtige Abstimmung bestimmter Farben von Vorlagen und Reproduktion.

Die Informationstheorie berührt auch die Probleme der Erhaltung der Identität der Ein- und Ausgangssignale. Es existieren in diesem Zusammenhang verschiedene Definitionen der sog. Übertragungstreue (Fidelity) [39] .

Der Bereich der Drucktechnik, in dem eine mathematische Beschreibung der Druckqualität besonders interessiert, ist der Mehrfarbendruck von detailreichen Bildern. Hier können eben wegen des Detailreichtums rein farbmetrische Betrachtungen bestenfalls nur zu sehr beschränkt gültigen Qualitätskriterien führen. Beim detailhaltigen Mehrfarbendruck sind jedoch die bei der Reproduktion einer Vorlage verursachten Verfälschungen der Farben und die Änderungen des Detailreichtums eng miteinander verknüpft. Eine Verfälschung der Farben durch den Übertragungsprozeß verursacht nämlich bei detailreichen Vorlagen gleichzeitig eine Veränderung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Farbraumelemente der Reproduktion. Beide Fehler werden daher, von den erwähnten Sonderfällen abgesehen, durch die im Bergerschen Diagramm enthaltenen informationstheoretischen Größen erfaßt. Deshalb erscheint es augenblicklich nicht nötig, den Begriff der Übertragungstreue gesondert einzuführen, zumal außerdem noch nach Voraussetzung (vergl. Abschnitt 4.2 über die Information eines Bildes) von einer positiven Vorlage immer eine positive Reproduktion hergestellt werden soll.

Irrelevanz

Zur Erläuterung dieses Begriffes wird Bild 23 betrachtet. Hier ist die Vorlage eine ideale Volltonfläche, der wieder nur ein einziges Farbraumelement zugeordnet ist. Damit wird $p(x_i) = p(x_1) = 1$ und der Informationsgehalt $H(x)$ der Vorlage gleich Null. Die von dieser Vorlage hergestellte Reproduktion besitze dagegen mehrere vom menschlichen Auge unterscheidbare Farbreize (Farbraumelemente), so daß $0 < p(y_j) < 1$ gilt. Da die Vorlage keinerlei unterscheidbare Farbraumelemente enthält, folgert der unbefangene Betrachter der Reproduktion, daß die dort beobachteten Details erst bei der Übertragung hinzugefügt wurden. Die dadurch vermittelte Information ist somit irrelevant, d.h. nach ihr war nicht gefragt, da sie nicht von der Vorlage her stammt.

Eine mathematische Ableitung ähnlich der bei der Erläuterung der Äquivokation sowie Bild 23 ergibt für die ideale Volltonfläche als Vorlage

$$p_{x1}(y_j) = p(y_j), \text{ wobei } p(y_j) < 1 \text{ gilt}$$

und
$$p_{yj}(x_1) = 1$$

Aus
$$p_{yj}(x_1) = 1 \quad \text{und} \quad p_{x1}(y_j) < 1$$

folgt, daß im vorliegenden Beispiel keine Äquivokation, also ausschließlich Irrelevanz auftritt.

Wegen
$$p_{x1}(y_j) = p(y_j) \quad \text{gilt} \quad H_x(y) = H(y),$$

d.h. die Irrelevanz ist gleich dem Informationsgehalt der Reproduktion.

Das Beispiel der Volltonfläche als Vorlage, bei dem keine Äquivokation auftritt, zeigt, daß die Irrelevanz $H_x(y)$ in der Drucktechnik ein Maß ist für die vom menschlichen Auge empfundene und durch den Übertragungsprozeß verursachte Erhöhung des Detailreichtums der Vorlage. Der entsprechende Zuwachs des Informationsgehaltes der Reproduktion ist gleich der Irrelevanz.

Zusammenfassend läßt sich folgendes über die drucktechnische Bedeutung von Äquivokation und Irrelevanz sagen:

Eine durch den Übertragungsprozeß verursachte Verringerung des Detailreichtums der Reproduktion wird vom menschlichen Beobachter als Informationsverlust empfunden. Dieser ist zahlenmäßig durch den mathematischen Ausdruck für die Äquivokation $H_y(x)$ beschreibbar.

Eine durch den Übertragungsprozeß verursachte Erhöhung des Detailreichtums der Reproduktion führt zu einem Zuwachs des Informationsgehaltes der Reproduktion. Dieser Zuwachs wird Irrelevanz genannt. Er läßt sich mit Hilfe der Gleichungen für $H_x(y)$ berechnen.

An dieser Stelle muß auf eine Besonderheit der Irrelevanz hingewiesen werden. Eine Erhöhung der Zahl der Unterscheidungsmerkmale in der Reproduktion gegenüber denjenigen in der Vorlage kann unter Umständen zu einer Irrelevanz führen, die zumindest teilweise vom Beobachter auswertbar ist. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn die Vorlage bei der Reproduktion vergrößert wird, wobei neue vorher unerkannte Details der Vorlage sichtbar werden (insbesondere bei der Vergrößerung von Mikrofilmen). Ein derartiger Anteil an auswertbarem Informationsgehalt in der Irrelevanz ist jedoch im Hinblick auf eine informationstheoretische Definition einer Druckgüte und bei dem Bestreben, die Übertragungseigenschaft drucktechnischer Systeme zu bewerten, nicht brauchbar.

Im Abschnitt 4.2 über die Information eines Bildes wurde der Betrachterabstand bei der Bestimmung des Informationsgehaltes festgelegt. Diese Übereinkunft gilt auch für die Reproduktion, da sie als Endprodukt einer Verfahrenskette vom Verbraucher im allge-

meinen mit dem bloßen Auge betrachtet wird. Liegt die Vorlage in einem anderen Maßstab vor als die Reproduktion, so müssen die Bildelemente der Vorlage entsprechend dem Maßstab vergrößert oder verkleinert werden, so daß die Zahl der betrachteten bzw. bei der Messung abgetasteten Bildelemente auf Reproduktion und Vorlage gleich ist. Auf diese Weise werden Vorlage und Reproduktion bei den informationstheoretischen Untersuchungen immer als gleichgroß angesehen. Ferner wird vorausgesetzt, daß die Vorlage keine unsichtbaren, für den menschlichen Beobachter erst in der Reproduktion auswertbaren Details enthält, die infolge der Eigenschaften des Übertragungssystems in der Reproduktion erscheinen (z.B. Volltonfläche mit Bildmotiv, das infolge zu feiner Farbunterschiede in der Vorlage nicht sichtbar ist, dagegen in der Reproduktion erscheint).

Unter diesen Voraussetzungen ist die gesamte Erhöhung des Detailreichtums in der Reproduktion vom menschlichen Beobachter nicht auswertbar. Der entsprechende Informationsgehalt, die Irrelevanz, ist nun in seiner Gesamtheit irrelevant, d.h. nach ihm war nicht gefragt.

Bei Einhaltung der Vorschrift über den Maßstab von Vorlage und Reproduktion wird zudem verhindert, daß Informationsverluste berücksichtigt werden, die beim Betrachten der verkleinerten Wiedergabe einer Vorlage mit dem bloßen Auge entstehen würden (im Extremfall: Betrachten eines Mikrofilmes mit dem bloßen Auge).

4.4 Definition einer Druckgüte q als Maß für die Druckqualität

4.4.1 Herleitung der Beziehung für die Druckgüte q

Die mathematische Beziehung für die Druckgüte q soll über eine thermodynamische Betrachtung gewonnen werden. Dieses Vorgehen wird gerechtfertigt durch die Aussage von Shannon, daß Informationsgehalt und Entropie nach Boltzmann aufgrund ihrer Definition identisch sind ([40], vergl. auch [41, 42,]). Es zeigt sich, daß die Abnahme des Informationsgehaltes eines Systems identisch ist mit der entsprechenden Zunahme der Entropie des Systems [42, 43].

Bei der Herleitung der Druckgüte q sollen nur diejenigen Energien bzw. Entropieänderungen erfaßt werden, die für die Informationsverarbeitung unbedingt erforderlich sind. Diese Voraussetzung ist notwendig, um Thermodynamik und Informationstheorie bei der folgenden Betrachtung möglichst eng miteinander zu verknüpfen. Die Weitergabe der Information von einem Träger auf den anderen erfordert eine gewisse Arbeit. Der die Information abgebende Träger verliert ein gewisses Maß an Energie, die notwendigerweise arbeitsfähig sein muß, da sie der Übertragung der Information an den neuen Träger dient. Diese Energie ist die zur Übertragung der Information minimal erforderliche Energie. Dieses Mindestmaß an Energie muß beispielsweise in einem von einer Bildfläche reflektierten Lichtstrahl enthalten sein, der auf einen lichtempfindlichen Film trifft, um an diesen

die Information weiterzugeben. Bei der thermodynamischen Herleitung der Druckgüte q interessieren somit die arbeitsfähigen Energien, die als solche auch in andere Energieformen umwandelbar sind. Eine derartige Energie bezeichnet man in der Thermodynamik mit Exergie [44].

Diese Überlegung zeigt, daß bei der Bewertung drucktechnischer Systeme mit Methoden der Thermodynamik Exergien eine Rolle spielen. Die zugehörige Güteziffer ist der exergetische Wirkungsgrad [45, 46]. Es liegt nun nahe, den exergetischen Wirkungsgrad eines Druckverfahrens zu berechnen, um ihn anschließend in den Bereich der Informationstheorie zu übertragen und mit Druckgüte q zu bezeichnen.

Zur Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades wird die Bilanz aller arbeitsfähigen Energien (=Exergien) gebildet, die durch die Bilanzhülle eines Systems hindurchtreten. Dies können im allgemeinsten Fall folgende Energien sein:

1. Arbeiten (z.B. mechanische, elektrische, magnetische)
2. Wärmemengen
3. Kinetische Energien der ein- und austretenden Medien
4. Potentielle Energien der ein- und austretenden Medien
5. Innere Arbeitsvermögen der ein- und austretenden Medien.

Es wird angenommen, daß die unter Punkt 3 und 4 genannten Energiearten nicht auftreten. Ferner sollen die Prozesse bei der Übertragung der Information isotherm verlaufen. Diese Annahme ist in der Drucktechnik berechtigt, da die Vorgänge meistens bei konstanter Umgebungstemperatur ablaufen und ein intensiver Wärmeaustausch mit der Umgebung gewährleistet ist.

Bild 28 zeigt die Bilanzhülle um das drucktechnische System mit den ein- und austretenden arbeitsfähigen Energien.

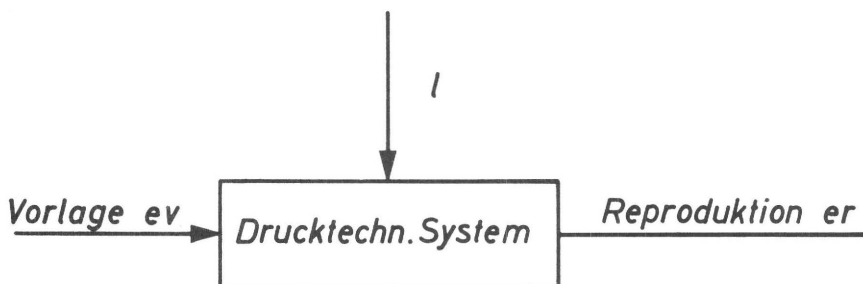


Bild 28: Das Druckverfahren, ein thermodynamischer Prozeß

Da die bei der vorliegenden Ableitung betrachteten Energiebeträge unmittelbar mit der Verarbeitung der Information zusammenhängen sollen, kann man sich vorstellen, daß alle Stellen der Informationsverarbeitung innerhalb des drucktechnischen Systems unmittelbar an der Bilanzhülle liegen. Diese verläuft z.B. durch die Druckzone, so daß die für die Überwindung der Reibung und die Verformung des Aufzuges erforderlichen Energiebeträge in der Bilanz nicht erscheinen.

In die Bilanzhülle des drucktechnischen Systems treten ein: das innere Arbeitsvermögen ev der Vorlage und die Summe I aller Arbeiten einschließlich der Differenz des arbeitsfähigen Anteiles der zu- und abgeführten Wärmemengen, die zur Informationsverarbeitung minimal erforderlich sind. Aus der Bilanzhülle tritt das innere Arbeitsvermögen er der Reproduktion. ev und er sind Energiemengen, die zur Übertragung der Information an die Vorlage bzw. an die Reproduktion minimal erforderlich sind. Im Falle von ev geschah die Energiezufuhr bei der Herstellung der Vorlage.

Damit lautet die Bilanzgleichung

$$ev + I = er + V \quad (9.1)$$

Da die Vorgänge bei der Informationsverarbeitung irreversibel sind, erscheint das Verlustglied V in der Bilanzgleichung. V ist derjenige Energiebetrag, der sich nicht in arbeitsfähige Energie umformen läßt; man nennt ihn auch Anergie.

Da Vorlage und Reproduktion nur inneres Arbeitsvermögen besitzen sollen, ist dieses gleich der gesamten Exergie von Vorlage und Reproduktion. Die Exergien von Vorlage und Reproduktion lassen sich in einen Anteil für die Volltonfläche und in die Änderung der Exergie bei Auftreten eines Bildmotives mit unterscheidbaren Farbreizen (Farbraumelementen) aufteilen.

Somit kann man schreiben:

$$ev = ev_v + \Delta ev \quad \text{für die Vorlage}$$

$$er = er_v + \Delta er \quad \text{für die Reproduktion}$$

Da nur ein Teil der in der Reproduktion unterscheidbaren Farbreize relevant ist, ergibt sich ferner die Beziehung

$$\Delta er = \Delta er_{rel} + \Delta er_{ir}$$

Setzt man diese Beziehungen in die Bilanzgleichung ein, so gilt:

$$ev_v + \Delta ev + I = er_v + \Delta er_{rel} + \Delta er_{ir} + V \quad (9.2)$$

Für den exergetischen Wirkungsgrad η_e gilt definitionsgemäß [44, 46].

$$\eta_e = \frac{\Delta W_z}{\Delta W_a}$$

Hierin ist $\Delta W_a = \Delta W_z + W$

ΔW_z stellt die gewollte Zunahme an arbeitsfähiger Energie und ΔW_a die dazu erforderliche Energie dar. Übrig bleibt der Verlust W , also die Summe derjenigen Energiearten, deren Entstehung bzw. Zunahme nicht erwünscht ist.

Im vorliegenden Fall ergibt sich

$$\Delta W_z = er_v + \Delta er_{rel} \quad (10.1)$$

$$\Delta W_a = ev_v + \Delta ev + I \quad (10.2)$$

Übrig bleiben die Restbeträge aus der Bilanzgleichung, die nicht erwünschten Energiebeiträge W .

Es gilt

$$W = \Delta er_{ir} + V \quad (10.3)$$

Somit nimmt der exergetische Wirkungsgrad eines drucktechnischen Systems die folgende Gestalt an

$$\eta_e = \frac{er_v + \Delta er_{rel}}{ev_v + \Delta ev + I}$$

Nach der Bilanzgleichung gilt

$$I = er_v + \Delta er + V - ev_v - \Delta ev$$

Setzt man diesen Ausdruck für I in die Gleichung für η_e ein, so entsteht die endgültige Form der Gleichung für den exergetischen Wirkungsgrad:

$$\eta_e = \frac{er_v + \Delta er_{rel}}{ev_v + \Delta ev + er_v + \Delta er + V - ev_v - \Delta ev}$$

$$\eta_e = \frac{er_v + \Delta er_{rel}}{er_v + \Delta er + V} \quad (11)$$

bzw.

Nach Boltzmann gilt für eine Entropieänderung die Beziehung

$$\Delta s = - k \sum_{i=1}^Z p(x_i) \cdot \ln p(x_i) \quad (12)$$

Die Gleichung für den Informationsgehalt lautet

$$H = - \sum_{i=1}^Z p(x_i) \cdot \lg p(x_i) \quad (13)$$

Wegen der Identität von Entropieänderung und Informationsgehalt ergibt der Vergleich beider Beziehungen

$$\Delta s = k \cdot \ln 2 \cdot H \quad (14)$$

Hierin ist k die Boltzmannsche Konstante. Die Größen s und H sind bis auf den Faktor $k \cdot \ln 2$ identisch [42, 43].

Nach den Gesetzen der Thermodynamik erfordert jede Abnahme der Entropie eine gewisse Energiezufuhr ΔE , die sich bei isothermen Vorgängen nach folgender Gleichung berechnet.

$$\Delta E = T \cdot \Delta s$$

In der Gleichung für den exergetischen Wirkungsgrad eines Druckprozesses sind die Δe -Werte mit ΔE identisch. Da isotherme Vorgänge angenommen wurden, gilt

$$\Delta e = T \cdot \Delta s \quad (15)$$

Wegen der Identität von Entropieänderung und Informationsgehalt kann man unter Berücksichtigung von Gleichung (14) schreiben

$$\Delta e = T \Delta s = T k \ln 2 H \quad (16.1)$$

$$\text{bzw.} \quad \Delta e = \quad = C H \quad (16.2)$$

$$\text{mit} \quad C = T k \ln 2$$

Zu jedem Δe -Wert in der Bilanzgleichung (9.2) und der Beziehung (11) für den exergetischen Wirkungsgrad gehört also ein bestimmter Informationsgehalt.

Im einzelnen ist

Δe_{rel} derjenige Energiebetrag, der zur Erzeugung der relevanten Information R benötigt wird

Δe derjenige Energiebetrag, der zur Erzeugung des Informationsgehaltes $H(y)$ der Reproduktion erforderlich ist

V derjenige Energiebetrag, der infolge der Irreversibilität des Druckprozesses auftritt. V steht neben Δe_{ir} in der Gleichung (10.3) für W. Da Δe_{ir} die irrelevanten Farbteile in der Reproduktion hervorruft, muß V den Informationsverlust (Äquivokation) $H_y(x)$ verursachen. Sowohl die Irrelevanz wie auch die Äquivokation entstehen aufgrund der Irreversibilität des Druckprozesses.

Mit der Gleichung (16.2) lautet die Beziehung für den exergetischen Wirkungsgrad

$$\eta_e = \frac{e_{rv} + C \cdot R}{e_{rv} + C \cdot H(y) + C \cdot H_y(x)} \quad (17.1)$$

bzw.

$$\eta_e = \frac{\frac{e_{rv}}{C} + R}{\frac{e_{rv}}{C} + H(y) + H_y(x)} \quad (17.2)$$

Es sei

$$\frac{e_{rv}}{C} = S_0$$

e_{rv} ist derjenige Energiebetrag, der zur Erzeugung einer idealen Volltonfläche als Reproduktion erforderlich ist.

Die Größe S_0 ist das Entropiemaß der idealen Volltonfläche als Reproduktion. Die drucktechnische Bedeutung von S_0 ist noch nicht erfaßbar. Solange dies der Fall ist, soll S_0 als frei wählbar gelten.

Mit Gleichung (17) ist der Übergang von der Thermodynamik in den Bereich der Informationstheorie vollzogen. Der exergetische Wirkungsgrad η_e wird gleich der Druckgüte q gesetzt. Es gilt

$$\eta_e = q = \frac{S_0 + R}{S_0 + H(y) + H_y(x)} \quad (18.1)$$

Nach den Gesetzen der Informationstheorie gilt (vergl. z.B. [47]):

$$H(x;y) = H(x) + H_x(y) = H(y) + H_y(x)$$

Setzt man diese Beziehung in Gleichung (18.1) ein, so erhält man endgültig

$$q = \frac{S_o + R}{S_o + H(y) + H_y(x)} = \frac{S_o + R}{S_o + H(x) + H_x(y)} = \frac{S_o + R}{S_o + H(x; y)} \quad (18.1)$$

4.4.2 Die drucktechnische Bedeutung der Druckgüte q

Die Druckgüte q ist im wesentlichen das Verhältnis des Transinformationsgehaltes R zum Informationsgehalt H(x) der Vorlage und der Irrelevanz $H_x(y)$. Auch der Drucker stellt beim Vergleich von Reproduktion und Vorlage zur Beurteilung der Druckqualität nicht einfach den Detailreichtum der Reproduktion demjenigen der Vorlage gegenüber; ihn interessiert also nicht das Verhältnis H(y)/H(x) der Informationsgehalte von Reproduktion und Vorlage. Der Drucker versucht vielmehr, in der Reproduktion die Vorlage mit ihren Details wiederzuerkennen. Diese Details der Vorlage, die in der Reproduktion erhalten bleiben, bestimmen aber die Höhe des Transinformationsgehaltes R. Mit wachsendem R, d.h. mit zunehmender Zahl der unterscheidbaren Merkmale der Vorlage in der Reproduktion, steigt auch die Druckqualität. Die Druckqualität wird dabei umso stärker anwachsen, je kleiner die Zahl der unterscheidbaren Merkmale in der Vorlage von vornherein war und je weniger die Störungen bei dem Übertragungsprozeß zu unerwünschten (irrelevanten) Merkmalen in der Reproduktion führen.

Wie der Aufbau von Gleichung (18) zeigt, ist die Druckgüte q ein Maß für die Güte des Übertragungsprozesses. Sie ist jedoch vermutlich auch ein Maß für die Druckqualität, wie sie im allgemeinen vom Drucker beurteilt wird. Dies zeigen einmal die vorstehenden Überlegungen; zum anderen sind die Variablen in Gleichung (18) bis auf die Konstante S_o Informationsgehalte, also Größen, die mit dem Empfinden des Druckers mehr oder weniger eng verknüpft sind (vergl. Abschnitt 4.2 über die Information eines Bildes). Es ist daher denkbar, daß die Zahlenwerte von q der Empfindungsskala des Druckers entsprechen, wie er sie bei der Beurteilung der Druckqualität verwendet.

Die Informationsgehalte in Gleichung (18) für die Druckgüte q lassen sich wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben messen bzw. berechnen. Nach geeigneter Wahl der Konstanten S_o (s. Abschnitt 4.4.4) kann der Zahlenwert der Druckgüte q bestimmt werden. Dabei werden Vorlage und Reproduktion miteinander verglichen. Es ist hierbei gleichgültig, in welcher Gestalt die Vorlage am Eingang des Übertragungskanal erscheint. Die Vorlage kann ein Dia oder ein Aufsichtsbild sein; wie es in der Reproduktionstechnik üblich ist. Sie kann aber auch das Original selbst sein. Es ist auch denkbar, daß der Andruck oder ein Druckprodukt optimaler Qualität als Bezugsbild gewählt werden. Der Begriff Vorlage soll im folgenden immer in dem hier beschriebenen allgemeinen Sinn verstanden werden.

Bei Verwendung der Druckgüte q in der Praxis läßt sich beispielsweise eine objektive Qualitätskontrolle während des Druckprozesses unter Einhaltung vorgegebener Toleranzen für q durchführen. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn an verschiedenen

Orten das gleiche Druckprodukt hergestellt werden soll. Voraussetzung für übereinstimmende q -Werte bei gleicher Druckqualität ist hierbei jedoch, daß die verschiedenen Druckereien gleiche Vorlagen zur Verfügung haben. Mit der Meßbarkeit der Druckgüte q als Maß für die Druckqualität wird auch der Weg frei für eine Qualitätsregelung drucktechnischer Systeme, insbesondere von Druckmaschinen.

In der Gleichung für die Druckgüte q sind die informationstheoretischen Größen R und $H(x; y)$ sowohl von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Farbreize (Farbraumelemente) in der Vorlage wie auch von den Eigenschaften des Übertragungskanals abhängig. Damit wird auch die Druckgüte q von diesen beiden Größen beeinflusst. Daraus folgt, daß sich die Druckgüte q auch mit dem Bildmotiv der Vorlage ändern kann, sofern dabei die Wahrscheinlichkeiten der Farbraumelemente neu verteilt werden.

Im Beispiel des Schwarzweißbildes in Bild 17 als Vorlage und seiner Reproduktion in Bild 24 wurden in den Abschnitten 4.2.2 und 4.3.2 folgende informationstheoretische Größen berechnet:

$$H(x) = 2,524 \quad \text{bit/Bildelement}$$

$$H(y) = 2,889 \quad \text{bit/Bildelement}$$

$$R = 1,547 \quad \text{bit/Bildelement}$$

$$H_y(x) = 1,067 \quad \text{bit/Bildelement}$$

$$H_x(y) = 1,432 \quad \text{bit/Bildelement}$$

Setzt man die Konstante S_0 in der Gleichung für die Druckgüte q gleich Null, so erhält man den Zahlenwert für q z.B. nach folgender Beziehung

$$q = \frac{R}{H(x) + H_x(y)} = \frac{1,457}{2,524 + 1,432} = 0,3683$$

Die Druckgüte q als Maß für die Druckqualität ergibt sich im vorliegenden Beispiel zu

$$q = 0,3683$$

bzw.

$$q = 36,83 \%$$

4.4.3 Bemerkung zum Wirkungsbereich der Informationstheorie innerhalb der Drucktechnik

Bei der Behandlung der drucktechnischen Bedeutung der Äquivokation (vergl. Abschnitt 4.3.3) zeigte es sich, daß Veränderungen der Farben in der Reproduktion, welche durch die verschiedenen Übertragungsprozesse innerhalb eines Druckverfahrens verursacht wurden, nicht in jedem Falle zu Äquivokation und damit im allgemeinen auch zu Irrelevanz führen. Das gleiche gilt auch für die Druckgüte q . Veränderungen von Farben in

der Reproduktion durch den Übertragungsprozeß beeinflussen die informationstheoretischen Größen nur dann, wenn sich gleichzeitig auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Farbraumelemente in der Reproduktion verändert (vergl. Abschnitt 4.3.3).

Die Farbverschiebungen selbst sind zum Teil erwünscht und zum Teil nicht erwünscht. Die unerwünschten Farbverschiebungen werden im allgemeinen auch den Zahlenwert der informationstheoretischen Größen beeinflussen. Der Fall, daß unerwünschte Farbverschiebungen keine Irrelevanz und Äquivokation hervorrufen, ist bei mehrfarbigen Bildern mit vielen Details unwahrscheinlich, da die Farbverschiebungen auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Farbraumelemente verändern. Wie bereits in Abschnitt 4.3.3 dargelegt wurde, ist dagegen eine unerwünschte Farbverschiebung ohne informationstheoretische Verluste denkbar, wenn die Vorlage nur sehr wenige unterscheidbare Farbreize besitzt.

Derartige Vorlagen sind z.B. Kompositionen von Volltonflächen (Schachbrettmuster) oder im Grenzfall die Volltonfläche selbst. Hier muß die Farbmétrie zu Rate gezogen werden. Mit ihrer Hilfe können die Übertragungseigenschaften so gewählt werden, daß keine – im vorliegenden Fall unerwünschte – Farbverschiebungen auftreten. Die Qualitätsregelung der Prozesse wird im wesentlichen eine farbmétrische Regelung sein.

Neben den unerwünschten Farbverschiebungen in der Reproduktion existieren noch die erwünschten. Dies sind Farbveränderungen, die durch eine Farbkorrektur hervorgerufen werden. Hierdurch entsteht praktisch eine neue Vorlage; ein blauer Himmel in der Vorlage soll beispielsweise in der Reproduktion rot erscheinen. Diese neue Vorlage liegt gleichsam am Ausgang eines Übertragungskanal, der den Prozeß der Farbkorrektur symbolisch darstellt. An seinem Eingang befindet sich die alte Vorlage.

Die informationstheoretische Betrachtung liefert nur Aussagen über etwaige Veränderungen des Detailreichtums in der neuen Vorlage gegenüber der ursprünglichen, also letztlich Aussagen über Veränderungen des Informationsgehaltes der ursprünglichen Vorlage.

Soll der Detailreichtum der ursprünglichen Vorlage in der neuen erhalten bleiben, sollen also nur Farbverschiebungen erfolgen (z.B. blauer Himmel soll rot werden), so ist die für diesen Prozeß errechnete Druckgüte q ein Maß für die Güte der Farbkorrektur im Hinblick auf die Erhaltung des Detailreichtums der ursprünglichen Vorlage. Die richtige Wiedergabe der korrigierten Farben in der neuen Vorlage ist ein farbmétrisches Problem. Informationstheoretisch betrachtet wird bei Erhaltung des Detailreichtums der ursprünglichen Vorlage nur der Code der Information verändert jedoch nicht die Information selbst (vergl. Abschnitt 4.2.3).

Der Zahlenwert von q wird von den Veränderungen des Detailreichtums der ursprünglichen Vorlage beeinflußt. Soll der Detailreichtum der ursprünglichen Vorlage nicht mehr in der korrigierten Vorlage erhalten bleiben, so kann auch eine für diesen Fall errechnete Druckgüte q keine Aussage mehr über die Güte der Farbkorrektur liefern, da die Erhal-

tung des Detailreichtums nicht angestrebt wird. In diesem Fall hilft dem Reprofachmann neben seinem Farbempfinden nur noch die Farbmeterik bei der Korrektur.

Die bisherigen Überlegungen zeigen, daß bei der Reproduktion beliebiger Vorlagen im wesentlichen zwei Aufgaben entstehen:

1. Die Herstellung einer reproduktionsfähigen Vorlage.

Hierbei kann vor allem die Farbmeterik und weniger die Informationstheorie dem Reprofachmann bei seiner Arbeit helfen. Wesentlich ist, daß er seine Information, wie die neue Vorlage aussehen soll, von Quellen außerhalb des drucktechnischen Systems erhält (z. B. von Kunden, aus eigener Eingebung). Die Informationstheorie, wie sie in dieser Arbeit angewandt wird, geht von der Information einer Vorlage aus, die selbst bereits Teil des drucktechnischen Systems ist. Da eine derartige informationstheoretische Betrachtung die Informationsquellen außerhalb des drucktechnischen Systems außer acht läßt, kann auch der hierbei definierte Gütebegriff die Güte einer Farbkorrektur nur im Hinblick auf die Erhaltung des Detailreichtums der ursprünglichen Vorlage und nicht im Hinblick auf die korrekte Wiedergabe bestimmter Farbreize erfassen.

Was den in diesem Abschnitt verwendeten Begriff „reproduzierbare Vorlage“ anbelangt, so soll darunter ein Bild verstanden werden, dessen Bildelemente diejenigen Farbreize besitzen, die die zugehörigen Bildelemente der Reproduktion bei idealer Übertragung erhalten sollen.

Liegen die selbstleuchtenden Farben eines Dia außerhalb des durch die Druckfarben und die Farbe des Bedruckstoffes reproduzierbaren Bereiches des Farbraumes, so können sie nicht reproduziert werden. Hier treten Informationsverluste bei der Übertragung auf, die mit Hilfe der Informationstheorie erfaßt werden können.

Ein Dia, dessen Farben bei idealer Übertragung in der Reproduktion wieder erscheinen sollten, ist demnach eine reproduktionsfähige Vorlage im Sinne dieses Abschnittes.

2. Reproduktion der reproduktionsfähigen Vorlage

Diese Aufgabe gehört zum eigentlichen Anwendungsbereich der Informationstheorie, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wurde. Wesentlich ist dabei, daß die Information, wie die Reproduktion aussehen soll, im vorliegenden Fall ausschließlich von der Vorlage, also von einer Informationsquelle innerhalb des drucktechnischen Systems kommt.

In der Praxis treten beide Aufgaben häufig gleichzeitig auf. Hierbei wird die erforderliche Farbkorrektur an den einzelnen Farbauszügen vorgenommen. Eine besondere korrigierte

Vorlage wird nicht hergestellt; sie entsteht nur ideell im Gehirn des Reprofachmannes. Die obigen Ausführungen gelten sinngemäß auch hier.

Zusammenfassend konzentriert sich der Inhalt dieses Abschnittes über den Wirkungsbereich der Informationstheorie innerhalb der Drucktechnik auf die folgende Aussage:

Solange eine reproduktionsfähige Vorlage noch nicht existiert, können psychologische und künstlerische Empfindungen in den Bereich der Drucktechnik eingreifen. Die Informationstheorie tritt in den Hintergrund, während die Farbmimetrik als Hilfsmittel der Reprotechnik wirksam eingesetzt werden kann.

Ist jedoch eine reproduktionsfähige Vorlage vorhanden, die im allgemeinen immer ein vom Kunden akzeptiertes Bezugsbild darstellt, so verbleibt nur noch die von psychologischen und künstlerischen Empfindungen freie Aufgabe, dieses Bezugsbild in einer vom Kunden gewünschten Qualität zu reproduzieren. Hier liegt der seinem Wesen nach industrielle Bereich der Drucktechnik und gleichzeitig der hauptsächliche Anwendungsbereich der Informationstheorie.

Die Anwendbarkeit der Informationstheorie in ihrer vorliegenden oder in einer erweiterten Form innerhalb der Drucktechnik scheint ein Kriterium dafür zu sein, ob die zu lösende Aufgabe in den mehr künstlerischen oder in den industriellen Bereich der Drucktechnik gehört.

4.4.4 Diskussion der Gleichung für die Druckgüte q , Festlegung der Konstanten S_0

Die Gleichung für die Druckgüte q lautet in einer der möglichen Formen der Gleichung 18.1

$$q = \frac{S_0 + R}{S_0 + H(x; y)}$$

Die Entropie S_0 ist der idealen Volltonfläche zugeordnet. Es sei wiederholt, daß solange die drucktechnische Bedeutung von S_0 noch nicht erfaßbar ist, die Größe S_0 als frei wählbar gelten soll.

Die Druckgüte q ist eine normierte, dimensionslose Größe, die zwischen dem Wert 0 bei absolut schlechtester Druckqualität und dem Wert 1 bei idealen Übertragungsverhältnissen schwankt. Der Grenzwert $q = 0$ wird erreicht

bei $S_0 = 0$ für $R = 0$

d. h., wenn die Reproduktion keinerlei Details mehr enthält, die von der Vorlage herühren, bei $S_0 \neq 0$ für

$$\lim_{H(x; y) \rightarrow \infty} \frac{S_0 + R}{S_0 + H(x; y)}$$

Der Fall $S_0 = 0$ ist nur für Vorlagen mit unterscheidbaren Farbreizen sinnvoll definiert. Eine ideale Volltonfläche als Vorlage, bei der R wegen $H(x) = R = 0$ für beliebige Übertragungsverhältnisse verschwindet, würde immer die Druckgüte $q = 0$ ergeben, obwohl eine reproduzierte Volltonfläche durchaus auch eine von Null verschiedene Druckqualität besitzen kann.

Der Fall $S_0 \neq 0$ umfaßt sämtliche denkbaren Bildmotive als Vorlage. Er schließt also auch die ideale Volltonfläche ein.

Bei der folgenden Diskussion soll zwischen der idealen Volltonfläche und einer Vorlage, deren Bildmotiv keine Volltonfläche darstellt, unterschieden werden.

1. Die Druckgüte q bei einer idealen Volltonfläche als Vorlage.

Hier gilt $H(x) = 0$ und damit auch $H_y(x) = R = 0$, d.h. sowohl Äquivokation als auch Transinformation verschwinden. Die Druckgüte q errechnet sich dann nach der Beziehung

$$q = \frac{S_0}{S_0 + H_x(y)} \quad \text{bzw.} \quad q = \frac{1}{1 + \frac{H_x(y)}{S_0}} \quad (18.2)$$

Bild 29 zeigt den Verlauf der Druckgüte q in Abhängigkeit der normierten Irrelevanz $H_x(y)/S_0$.

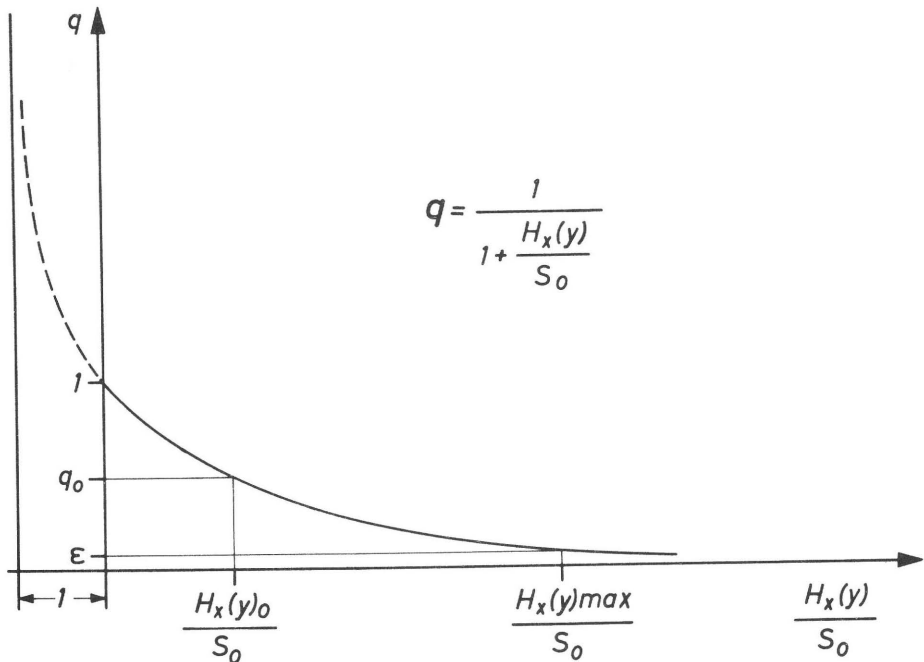


Bild 29: Die Druckgüte q als Funktion von $H_x(y)/S_0$

Dem Verlauf der Druckgüte kann man entnehmen, daß q erst für unendlich hohe Irrelevanzen $H_x(y)$ zu Null wird. In der Praxis wird man daher verlangen, daß bei schlechtester Druckqualität die Druckgüte q einen beliebig kleinen vorgegebenen Grenzwert ϵ erreicht. In diesem Grenzfall wird die Irrelevanz $H_x(y) = H_x(y)_{\max}$. Mit ϵ und $H_x(y)_{\max}$ liegt auch die Konstante S_0 fest. Im Grenzfall der schlechtesten Druckqualität gilt

$$1 + \frac{H_x(y)_{\max}}{S_0} = \frac{1}{\epsilon}$$

$$\frac{S_0}{H_x(y)_{\max}} = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon}$$

bzw.

$$S_0 = H_x(y)_{\max} \cdot \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \quad (19.1)$$

da $\epsilon \ll 1$ gilt, kann man auch näherungsweise schreiben

$$S_0 \cong H_x(y)_{\max} \cdot \epsilon \quad (19.2)$$

Bezieht man sich nicht auf den Grenzfall $q = \epsilon$, sondern auf eine Druckgüte q_0 , die zwischen ϵ und 1 liegt, so gilt für S_0 sinngemäß

$$S_0 = H_x(y)_0 \cdot \frac{q_0}{1 - q_0} \quad (19.3)$$

Die Druckgüten q_0 und ϵ werden zur Berechnung von S_0 vorgegeben. Zur Bestimmung der noch unbekannten Irrelevanz $H_x(y)_0$ bzw. $H_x(y)_{\max}$ gibt es grundsätzlich zwei Methoden.

1.1 Gegeben ist eine reproduzierte Volltonfläche, der die Druckgüte q_0 zugeordnet wird.

In diesem Fall kann die zugehörige Irrelevanz $H_x(y)_0$ durch einen Vergleich mit der Vorlage gemessen werden. Das entsprechende gilt, wenn dem Bezugsbild die schlechteste Druckgüte zugeordnet wird. Dann wird die maximale Irrelevanz $H_x(y)_{\max}$ gemessen.

Mit den nun bekannten Zahlenwerten für die Druckgüte und die Irrelevanz des Bezugsbildes läßt sich die Konstante S_0 nach Gleichung (19) berechnen.

1.2 Gegeben ist nur die Vorlage, eine ideale Volltonfläche.

Bei der idealen Volltonfläche als Vorlage wird $H(x) = R = 0$. Damit stimmen der Informationsgehalt $H(y)$ der Reproduktion und die Irrelevanz $H_x(y)$ überein (vergl. Berger'sches Diagramm, Bild 30).

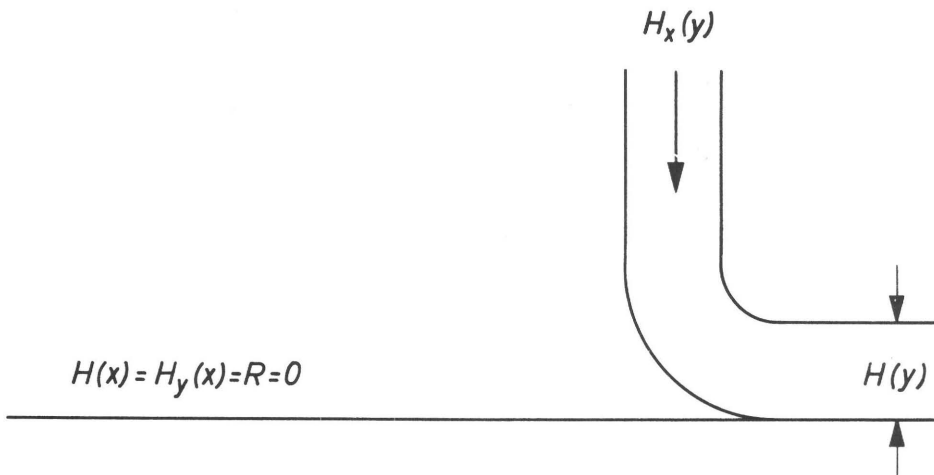


Bild 30: Bergersches Diagramm bei der idealen Volltonfläche als Vorlage

Für die Volltonfläche gilt

$$H_x(y) = H(y) = - \sum_{j=1}^n p(y_j) \cdot \lg p(y_j) \quad \text{bit/Bildelement} \quad (20.1)$$

In dieser Gleichung sind

$p(y_j)$ die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten (die relativen Häufigkeiten) der verschiedenen Farbraumelemente auf der reproduzierten Volltonfläche

n die Zahl der Farbraumelemente auf der reproduzierten Volltonfläche.

Bei Gleichverteilung der $p(y_j)$ wird der Informationsgehalt $H(y)$ und damit auch die Irrelevanz $H_x(y)$ am größten. Es gilt dann die Beziehung

$$H_x(y)_{\max} = \lg n \quad (20.2)$$

Da keine Reproduktion als Bezugsbild vorhanden ist, muß die Irrelevanz $H_x(y)_0$ bzw. $H_x(y)_{\max}$ zur Berechnung der Konstanten nach Gleichung (19) näherungsweise bestimmt werden. Dabei wählt man aufgrund von Erfahrungswerten die Flächenanteile (relative Häufigkeiten $p(y_j)$) der verschiedenen durch Störungen hervorgerufenen Farben (Farbraumelementen). Dann läßt sich der Schätzwert von $H_x(y)_0$ nach Gleichung (20.1) berechnen. Will man sich auf den Maximalwert der Irrelevanz beziehen, so schätzt man wiederum mit Hilfe der Erfahrung die Zahl n der auf der reproduzierten Volltonfläche unterscheidbaren Farben (Farbraumelemente). Die maximale Irrelevanz $H_x(y)_{\max}$ errechnet sich in diesem Fall nach Gleichung (20.2).

Mit den Bezugswerten $H_x(y)_0$ und q_0 bzw. $H_x(y)_{\max}$ und ϵ kann nun die Konstante S_0 nach Gleichung (19) berechnet werden. Am sichersten wird die Näherungsrechnung für den Grenzfall $q = \epsilon$ da hier nur die Zahl n und nicht die relative Häufigkeit der Farbraumelemente auf der reproduzierten Volltonfläche geschätzt werden muß.

Sind beispielsweise $n = 16$ unterscheidbare Farben (Farbraumelemente) auf der reproduzierten Volltonfläche zu beobachten, so errechnet sich $H_x(y)_{\max}$ zu

$$H_x(y)_{\max} = \text{Id } 16 = 4 \text{ bit/Bildelement}$$

Beispiel: Sonderfall der Volltonfläche, zu deren Reproduktion nur eine Druckfarbe erforderlich ist. Bei idealer Reproduktion soll die Bildfläche mit einer Farbschicht konstanter Dicke bedeckt sein. Dies bedeutet, daß alle Bildelemente die gleiche Farbe besitzen. Im Störungsfalle soll der Beobachter nichtgedeckte Bildelemente auf der Bildfläche erkennen können. Es existieren also nur zwei verschiedene Farbraumelemente (Farben) auf der reproduzierten Volltonfläche; damit wird $n = 2$

Die Irrelevanz $H_x(y)$ berechnet sich für diesen Sonderfall nach der Beziehung

$$H_x(y) = - [\varphi \text{Id } \varphi + (1 - \varphi) \text{Id } (1 - \varphi)] \quad \text{bit/Bildelement} \quad (20.3)$$

In dieser Gleichung ist $\varphi = p(y_1)$ die relative Häufigkeit (der Flächenanteil) der gedeckten Bildfläche und $1 - \varphi = p(y_2)$ die relative Häufigkeit (der Flächenanteil) der ungedeckten Bildfläche. Da $n = 2$ ist, könnte φ im vorliegenden Sonderfall auch der Flächeninhalt der ungedeckten Bildfläche sein.

Die Druckgüte soll beispielsweise 10 % betragen, wenn nur 80 % der Bildfläche gedeckt wird, wenn also 20 % der Bildfläche infolge schlechter Übertragung ungedeckt bleiben. Damit wird $q = q_0 = 0,1$ und $\varphi = 0,8$. Die Irrelevanz $H_x(y)_0$ errechnet sich dann nach Gleichung (20.3) zu

$$\begin{aligned} H_x(y)_0 &= - (0,8 \text{Id } 0,8 + 0,2 \text{Id } 0,2) = \\ &= 0,258 + 0,464 = 0,722 \end{aligned}$$

$$H_x(y)_0 = 0,722 \text{ bit/Bildelement}$$

Die Konstante S_0 erhält man nach Gleichung (19.3). Es ergibt sich

$$S_0 = H_x(y)_0 \frac{q_0}{1 - q_0} =$$

$$= 0,722 \cdot \frac{0,1}{1 - 0,1} = 0,0803$$

$$S_0 = 0,0803$$

Damit lautet die Gleichung für die Druckgüte q im vorliegenden Beispiel

$$q = \frac{1}{1 + \frac{H_X(y)}{0,0803}}$$

Die maximale Irrelevanz ergibt sich im vorliegenden Sonderfall zu

$$H_X(y)_{\max} = \lg n = \lg 2 = 1 \text{ bit/Bildelement}$$

Dieser Fall tritt auf für $\varphi = 0,5$, d.h. wenn 50 % der Bildfläche gedeckt sind.

Wählt man die Druckgüte $q = \epsilon = 10^{-3}$, so berechnet sich die Konstante S_0 mit $H_X(y)_{\max} = 1$ bit/Bildelement nach Gleichung (19.2) zu

$$\begin{aligned} S_0 &\cong H_X(y)_{\max} \cdot \epsilon = \\ &= 1 \cdot 10^{-3} = 10^{-3} \\ S_0 &\cong 10^{-3} \end{aligned}$$

Die Gleichung für die Druckgüte q lautet dann

$$q = \frac{1}{1 + \frac{H_X(y)}{10^{-3}}}$$

Diskussion der Gleichung (20.3) für die Irrelevanz $H_X(y)$ einer reproduzierten Volltonfläche, auf der zwei verschiedene Farben (Farbraumelemente) zu beobachten sind.

Die Beziehung lautet

$$H_X(y) = -[\varphi \lg \varphi + (1 - \varphi) \lg (1 - \varphi)]$$

bit/Bildelement

Der Verlauf der Irrelevanz $H_X(y)$ als Funktion des Flächenanteiles φ ist in Bild 31 dargestellt.

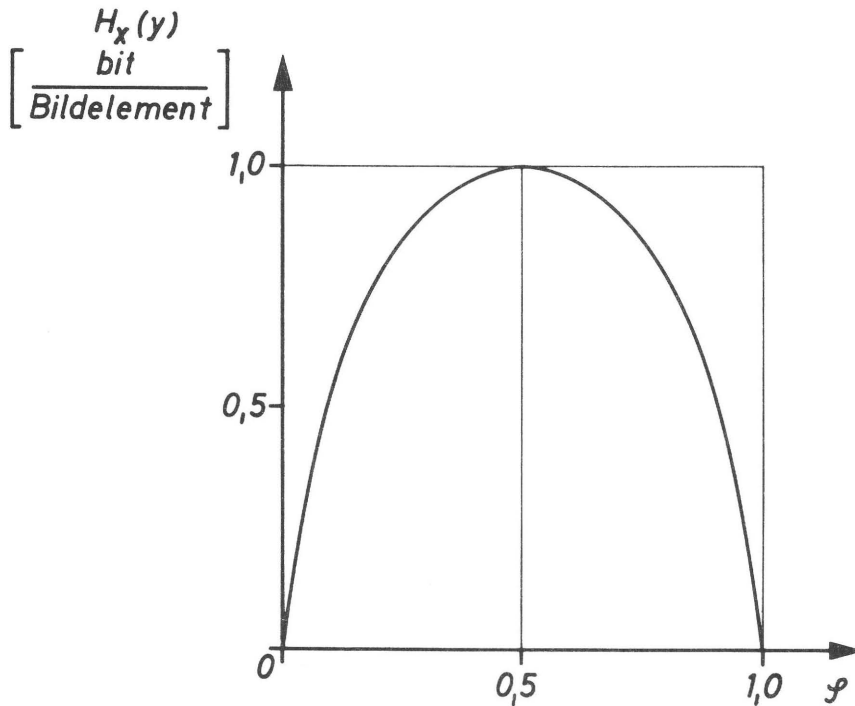


Bild 31: Die Irrelevanz $H_x(y)$ als Funktion des Flächenanteiles φ

Interessant ist hierbei, daß die Irrelevanz $H_x(y)$ für $\varphi < 0,5$ wieder sinkt. Damit steigt auch die Druckgüte q wieder an. Für $\varphi < 0,5$ überwiegen nun nicht mehr die bedruckten, sondern die unbedruckten Bildelemente. In diesem Fall sind die nichtdruckenden Stellen die „gewünschten“ Ereignisse, während die noch verbleibende bedruckte Bildfläche als Störung betrachtet wird. Die Druckgüte q erreicht bei $\varphi = 0,5$ ihren minimalen Wert ϵ , um für $\varphi < 0,5$ entgegen dem Empfinden des Druckers wieder anzusteigen. Für die Anwendung der Druckgüte q in der Drucktechnik ist dies jedoch ohne Bedeutung. Die Druckqualität wird nämlich in der Praxis für $\varphi = 0,5$ bereits extrem schlecht sein. Man darf ohne weiteres voraussetzen, daß z.B. der Drucker seine Maschine so gut eingerichtet hat, daß wenigstens 50 % der Bildfläche gedeckt sind.

Diese Überlegungen gelten sinngemäß auch für eine beliebige Zahl von irrelevanten Farbreizen auf einer reproduzierten Volltonfläche.

2. Die Druckgüte q bei einer Vorlage, deren Bildmotive keine Volltonfläche darstellt, also mehrere unterscheidbare Farbreize besitzt.

In diesem Fall gilt die folgende Beziehung für die Druckgüte q

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{S_0 + R}{S_0 + H(x; y)} = \\
 &= \frac{S_0 + R}{S_0 + R + H_y(x) + H_x(y)} \\
 q &= \frac{1}{1 + \frac{H_y(x) + H_x(y)}{S_0 + R}} \quad (18.3)
 \end{aligned}$$

Bild 32 zeigt den Verlauf der Druckgüte q in Abhängigkeit der normierten Summe von Äquivokation und Irrelevanz.

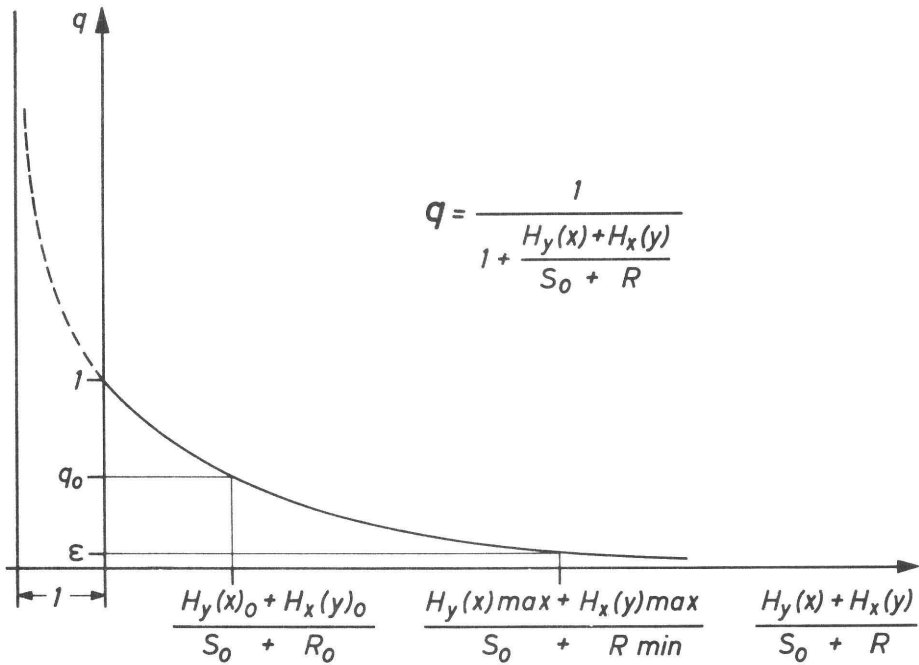


Bild 32: Die Druckgüte q als Funktion von $\frac{H_y(x) + H_x(y)}{S_0 + R_0}$

Der Aufbau von Gleichung 18.3 zeigt, daß der Einfluß von Äquivokation und auf die Druckgüte q mit wachsender Transinformation geringer wird. Dieses Verhalten ist in der Drucktechnik bekannt. Nicht ausdrückende Rasterpunkte auf einer Druckplatte wirken beim Betrachten des einfarbigen Abzuges störender als nach dem Zusammendruck mit den übrigen Druckfarben.

Festlegung der Konstanten S_0

Im vorliegenden Fall ist auf der Bildfläche der Vorlage mehr als ein Farbraumelement zu beobachten. Daher ist auch ihr Informationsgehalt $H(x)$ größer als Null. Dies bedeutet, daß die Transinformation R im Gegensatz zur Volltonfläche nicht in jedem Fall verschwindet. Die Druckgüte q erhält auch für $S_0 = 0$ einen drucktechnischen Sinn. Setzt man $S_0 = 0$, so entsteht für die Druckgüte q die Beziehung

$$q = \frac{R}{H(x; y)} \quad (18.4)$$

Im Falle absolut schlechtester Druckqualität gilt $R = 0$; damit wird die Druckgüte $q = 0$. Bei idealer Druckqualität treten keine Übertragungsverluste und keine Irrelevanz auf. Wegen $H_y(x) = H_x(y) = 0$ gilt $q = 1$. Die Druckgüte q schwankt somit zwischen den beiden Grenzwerten 0 und 1.

Das Nullsetzen von S_0 hat den Vorteil, daß man sich um die Bestimmung dieser Konstanten keine weiteren Gedanken zu machen braucht. Auf der anderen Seite geht durch diese Festlegung von S_0 die Möglichkeit verloren, den Zahlenwert der Druckgüte einer bestimmten Empfindungsskala des Druckers für die Druckqualität anzupassen. Ob dies wirklich ein Nachteil ist, muß die Messung der Druckgüte q in der Praxis zeigen, was gegenwärtig aus gerätetechnischen Gründen noch nicht möglich ist.

Soll S_0 von Null verschieden gewählt werden, so ergeben sich analog zu den Betrachtungen bei der Volltonfläche wieder grundsätzlich zwei Möglichkeiten.

2.1 Es existiert eine Reproduktion als Bezugsbild, deren Druckgüte q vorgegeben ist.

In diesem Fall können die informationstheoretischen Größen durch einen Vergleich mit der Vorlage gemessen werden.

Wird der Reproduktion die schlechteste Druckgüte $q = \epsilon$ zugeordnet, so erhält man beim Vergleich mit der Vorlage die Grenzwerte $H_y(x)_{\max}$, $H_x(y)_{\max}$ und R_{\min} .

Die Konstante S_0 errechnet sich dann wie folgt

$$\epsilon = \frac{1}{1 + A}$$
$$A = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon}$$

mit
$$A = \frac{H_Y(x)_{\max} + H_X(y)_{\max}}{S_0 + R_{\min}} = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon}$$

Daraus folgt
$$S_0 = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} (H_Y(x)_{\max} + H_X(y)_{\max}) - R_{\min} \quad (21.1)$$

Wird dem Bezugsbild die Druckgüte $q = q_0$ zugeordnet, so ergibt die Messung die informationstheoretischen Größen $H_Y(x)_0$, $H_X(y)_0$ und R_0 . Die Konstante S_0 erhält man dann mit Hilfe der Gleichung

$$S_0 = \frac{q_0}{1 - q_0} (H_Y(x)_0 + H_X(y)_0) - R_0 \quad (21.2)$$

2.2 Es ist nur die Vorlage gegeben.

Die Konstante S_0 muß nun festgelegt werden, ohne daß Bezug auf eine vorhandene Reproduktion vorgegebener Druckqualität genommen werden könnte.

Stellt man sich ein Bezugsbild vor, bei dem die Transinformation R neben der Äquivokation und Irrelevanz von Null verschieden ist, so können die informationstheoretischen Größen zur Berechnung der Konstanten S_0 wegen der Kompliziertheit der Übertragungsverhältnisse nicht mehr sinnvoll geschätzt werden.

Aus diesem Grund interessiert hier nur der Grenzfall schlechtester Druckqualität mit der zugehörigen Druckgüte $q = \epsilon$, bei der die Reproduktion keinerlei Details der Vorlage mehr enthält. Dies bedeutet $R = 0$; das Bergersche Diagramm besitzt dann die in Bild 33 dargestellte Form.

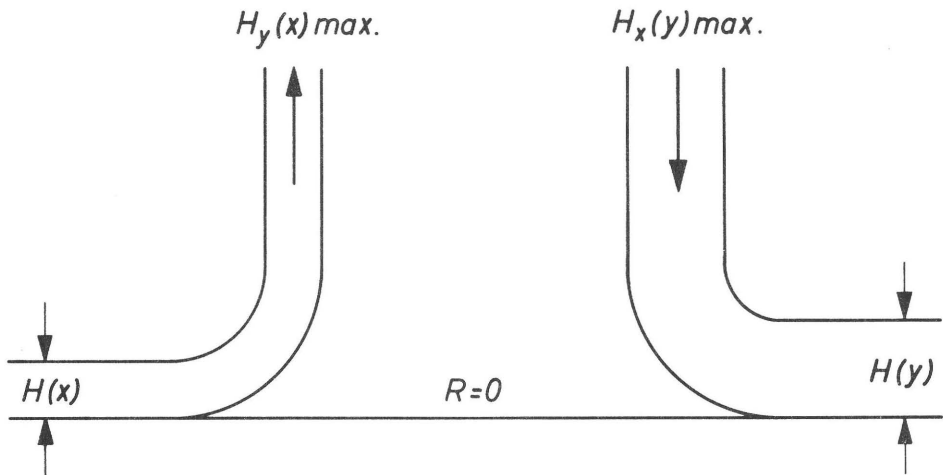


Bild 33: Bergersches Diagramm bei minimaler Druckgüte q

Die Gleichung für die Berechnung der Konstanten S_0 lautet im vorliegenden Fall

$$S_0 = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} (H_Y(x)_{\max} + H_X(y)_{\max}) \quad (21.3)$$

Die maximale Äquivokation $H_Y(x)_{\max}$ ist gleich dem Informationsgehalt der Vorlage; es gilt daher $H_Y(x)_{\max} = H(x)$.

Für den Fall, daß keine Transinformation R auftritt, gilt immer (Vergl. z.B. [47])

$$p(x_i; y_j) = p(x_i) \cdot p(y_j)$$

Durch Vergleich mit der Beziehung

$$p(x_i; y_j) = p(x_i) \cdot p_{x_i}(y_j)$$

ergibt sich

$$p(y_j) = p_{x_i}(y_j)$$

$$p(x_i) = p_{y_j}(x_i)$$

Wie die Ausgangsgleichung dieser kurzen Ableitung zeigt, sind die Wahrscheinlichkeiten $p(y_j)$ und damit auch die Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{x_i}(y_j)$ unabhängig von $p(x_i) = p_{y_j}(x_i)$ wählbar. Damit ergeben sich beliebige Zahlenwerte für die Irrelevanz $H_X(y)_{\max}$.

Es ist

$$H_X(y)_{\max} = H(y) = - \sum_j p(y_j) \cdot \text{ld } p(y_j) \quad (22.1)$$

Es ist sehr schwierig die Verteilung der Wahrscheinlichkeiten $p(y_j)$ vorherzusagen, da das Verwischen der Details der Vorlage, d.h. das Verschwinden der zu übertragenden Nutzinformation vom jeweiligen Reproduktionsverfahren abhängt. Aus diesem Grunde erscheint es zweckmäßig, den Bezugswert $H_X(y)_{\max}$ gleich der im jeweiligen Fall maximal möglichen Irrelevanz zu setzen. Es gilt dann

$$H_X(y)_{\max} = H(y)_{\max} = \text{ld } n \quad (22.2)$$

Hierbei ist n die Zahl der in der Reproduktion unterscheidbaren Farbraumelemente. Mit $H_X(y)_{\max} = \text{ld } n$, gilt auch $p(y_j) = \frac{1}{n} = p_{x_i}(y_j)$, d.h. die Störungen sind gleich verteilt.

Die Gleichungen 22.1 und 22.2 stimmen mit den Beziehungen 20.1 und 20.2 für die ideale Volltonfläche als Vorlage überein. Dies ist verständlich, da in beiden Fällen keine Transinformation auftritt (vergl. Bild 30 und 33).

Die Zahl n in Gleichung (22.2) läßt sich abschätzen. Nimmt man an, daß pro Druckfarbe n_i unterscheidbare Farben (Farbraumelemente) denkbar sind und diese n_i unterschiedlichen Farben im Zusammendruck wieder unterscheidbare Farben ergeben, so gilt

$$H_x(y)_{\max} = \text{ld } n_1 + \text{ld } n_2 + \dots + \text{ld } n_f = \text{ld } \prod_{i=1}^f n_i \quad (22.3)$$

Hierin ist f die Zahl der in der Reproduktion verwendeten Druckfarben.

Beispiel: Eine Reproduktion werde im Vierfarbendruck hergestellt. Pro Druckfarbe seien $n_i = 16$ unterscheidbare Farben (Farbraumelemente) denkbar. Damit erhält man eine maximale Irrelevanz von

$$H_x(y)_{\max} = f \cdot \text{ld } n = 4 \cdot \text{ld } 16 = 16 \quad \text{bit/Bildelement}$$

Dieser Wert liegt etwas unterhalb des Informationsgehaltes eines Bildelementes bei Vorhandensein aller überhaupt denkbaren Körperfarben, welcher nach Meyer-Eppler [32] 17 bis 23 bit/Farbraumelement (Bildelement) beträgt.

Die Äquivokation $H_y(y)_{\max} = H(x)$ der Vorlage und die Irrelevanz $H_x(y)_{\max} = \text{ld } \prod_{i=1}^f n_i$ der Reproduktion werden in die Gleichung 21.3 zur Berechnung der Konstanten S_0 eingesetzt. Damit ist auch die Gleichung für die Druckgüte q bestimmt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Druckverfahren lassen sich in eine Kette von Grundbausteinen zerlegen, welche die Stellen möglicher Informationsverluste symbolisieren. Dadurch wird die Kompliziertheit des Grundaufbaues der Verfahren sichtbar. Die Kanalelemente mit und ohne Trägerwechsel bilden die Grundbausteine. Aus der Tatsache, daß die Information in der Drucktechnik häufig eine Verbindung mehrerer Träger zu einer Trägerkette als Transportmittel verwendet, ergeben sich eine Reihe unterschiedlicher Typen von Kanalelementen mit Trägerwechsel (KEW). Insgesamt existieren 28 sinnvolle (= praktisch realisierbare) Typen von KEW, von denen 11 die Information durch Auswechseln der sog. Hauptträger sehr direkt weitergeben. Die Typen der KEW bestimmen die Art des Grundaufbaues der Verfahren.

Die Untersuchung der verschiedenen Typen der KEW und des Aufbaues der Ketten dieser Elemente führt zu einer Systematik der Druckverfahren. Losgelöst von der technischen Gestalt lassen sich die Grundaufbauten verschiedener Verfahren leichter miteinander vergleichen. Die Darstellung der Systeme als Kette von Kanalelementen erleichtert zudem die Verbesserung und Neuentwicklung von Druckverfahren.

Druckverfahren dienen der Verbreitung von Informationen. Es liegt daher nahe, die Informationstheorie zur Beschreibung der Verfahren heranzuziehen. Bei der Anwendung der Informationstheorie in der Drucktechnik entstehen drei Problemkreise:

1. Beschreibung und Messung der Informationsmenge, die der Mensch, im speziellen Fall der Drucker, beim Betrachten eines Bildes aufnimmt.
2. Informationstheoretische Beschreibung und meßtechnische Erfassung des Vergleiches zweier Bilder zur Beurteilung der Druckqualität.
3. Untersuchung des Einflusses des Übertragungsverhaltens des gesamten Druckverfahrens oder seiner Teilsysteme auf das Druckergebnis.

In dieser Arbeit wurden nur die beiden ersten Punkte behandelt.

Der erste Problemkreis wurde im Abschnitt über die Information eines Bildes bearbeitet. Zunächst wurde die Berechnung und Messung des Informationsgehaltes eines Bildes erläutert. Bei diesen Überlegungen wurde vor allem das spektrale Auflösungsvermögen des menschlichen Auges mitberücksichtigt, so daß Detailreichtum und Feinheit der Farbabstufung ihren zahlenmäßigen Niederschlag im Informationsgehalt finden. Das Schema eines Gerätes zur Messung des Informationsgehaltes eines Bildes wurde vorgestellt.

Die Informationstheorie unterscheidet zwischen dem Inhalt und dem Gehalt einer Information. Im Bereich der Drucktechnik liefert der Informationsgehalt eine Aussage über den Detailreichtum bzw. über die Zahl der vom Auge unterscheidbaren Farbreize. Der Inhalt dagegen gibt an, welche Bedeutung die einzelnen Details für den Beobachter besitzen. Bilden diese beispielsweise ein Haus, so ist „Haus“ der Inhalt der Information.

Die von Shannon begründete Informationstheorie erfaßt nur den Gehalt einer Information und nicht den Inhalt. Die Anwendbarkeit in der Drucktechnik steht und fällt mit der Antwort auf die Frage: Spielt der Inhalt einer Information in der Drucktechnik eine Rolle, beeinflußt er beispielsweise das Urteil des Druckers über die Druckqualität? Eine Untersuchung des Zusammenhanges zwischen dem Inhalt und dem Gehalt einer Information führte zu dem Ergebnis, daß innerhalb bestimmter Bildmotivgruppen Inhalt und Gehalt in einem konstanten Verhältnis zueinander stehen. Somit wird es innerhalb dieser Motivgruppen möglich, gleiche Änderungen des Inhaltes einer Information durch gleiche Änderungen des Gehaltes zu beschreiben. Dies gilt um so mehr, da bei der Beurteilung der Druckqualität ausgesprochen psychologische Beweggründe ausgeklammert werden müssen. Einmal können diese von Betrachter zu Betrachter u.U. recht stark variieren, zum anderen sind sie dem Drucker meistens unbekannt. Sein Urteil über die Druckqualität wird im wesentlichen vom Detailreichtum, der Registerhaltigkeit, also letztlich vom Informationsgehalt geprägt sein. Den Drucker interessiert eben vielmehr, wie ein Bild gedruckt ist und weniger, was es darstellt. Er möchte bei der Beurteilung eines Druckes in erster Linie Informationen über die Güte des Übertragungsprozesses erhalten. Das Bildmotiv ist hierbei zweitrangig. Somit läßt sich feststellen, daß die Informationstheorie, welche durch die Beschränkung auf den Informationsgehalt den Inhalt a priori nicht berücksichtigt, durchaus geeignet ist, die Qualität von Reproduktionen und drucktechnischen Übertragungssystemen so zu beschreiben, wie sie vom Drucker und damit auch vom Durchschnittsbetrachter empfunden wird.

Bei der Behandlung des zweiten der oben genannten Problemkreise wurde der Zusammenhang zwischen Informationstheorie und Druckqualität untersucht. Hierbei wurde mit Hilfe meßbarer informationstheoretischer Größen eine Druckgüte definiert, die als Maß für die Druckqualität dem Empfinden des Druckers bei der Beurteilung von Reproduktionen entsprechen soll.

Eine tiefergehende Erklärung des Begriffes Information besagt, daß die Information ein Maß für den Zustand der Ordnung in Materie oder Energie ist. Die Thermodynamik kennt den Begriff der Entropie, der ein Maß für die Unordnung in Materie oder Energie darstellt. Sowohl die Information wie auch die Entropie werden nach Gleichungen berechnet, die im wesentlichen den gleichen Aufbau besitzen. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich nun, daß beide Größen über die formale Übereinstimmung der mathematischen Ausdrücke hinaus identisch sind.

Aufgrund dieses engen Zusammenhanges zwischen Thermodynamik und Informationstheorie, lag es nahe, das Druckverfahren wie ein thermodynamisches System zu betrachten, seinen exergetischen Wirkungsgrad zu berechnen, um diesen anschließend in den Bereich der Informationstheorie zu übertragen und mit Druckgüte q zu bezeichnen.

Mit dieser thermodynamischen Herleitung kann die Druckgüte q folgendermaßen definiert werden:

$$q = \frac{S_0 + R}{S_0 + H(x) + H_x(y)} = \frac{S_0 + R}{S_0 + H(y) + H_y(x)}$$

Hierin ist	$H(x)$	der Informationsgehalt der Vorlage
	$H(y)$	der Informationsgehalt der Reproduktion
	R	die Transinformation
	$H_y(x)$	der Informationsverlust (Äquivokation)
	$H_x(y)$	die Irrelevanz

Die Äquivokation $H_y(x)$ ist derjenige Teil des Informationsgehaltes der Signale am Eingang des Kanales, der bei der Übertragung verloren geht. Drucktechnisch gesehen führt dieser Informationsverlust zu einer Verringerung des Detailreichtums sowie zu einer Verfälschung der Farben in der Reproduktion. Die Irrelevanz $H_x(y)$ ist derjenige Teil des Informationsgehaltes der Signale am Ausgang des Übertragungskanales, der bei der Übertragung neu hinzugekommen ist. Im Bereich der Drucktechnik entstehen hierbei unerwünschte Details in der Reproduktion, die beispielsweise durch eine ungleichmäßige Farbdeckung hervorgerufen werden können. Die relevante, am Ausgang des Übertragungskanales verfügbare Information wird Transinformation R genannt. Sie ist dafür verantwortlich, daß das Bildmotiv der Vorlage in der Reproduktion wiedererkannt werden kann.

Die Größen in der Gleichung für die Druckgüte q sind im Bergerschen Diagramm enthalten. Sie können mit Hilfe eines Meßgerätes bestimmt werden, das im Prinzip genauso ausgebaut ist wie **dasjenige Gerät, welches zur Messung des Informationsgehaltes eines Bildes verwendet werden kann.**

S_0 ist eine Konstante, die die **Anpassung der Druckgüte q** an eine bestimmte dem Drucker geläufige Wertskala der Druckqualität ermöglicht. Damit enthält die Gleichung für q keine Unbekannten mehr; die Druckgüte q kann berechnet werden.

Systematik und Informationstheorie bilden die Systemtheorie der Druckverfahren. Beide Teilgebiete ergänzen einander. Während die Systematik die Stellen möglicher Informationsverluste offenlegt, ermöglicht die Informationstheorie eine Aussage über die Höhe dieser Verluste.

Die Systemtheorie führt zu einem tieferen Verständnis der Drucktechnik, insbesondere durch die Anwendung der Informationstheorie. Damit rückt die Drucktechnik in den Bereich der allgemeinen Nachrichtentechnik, zu der sie ihrem Wesen nach hingehört. Die

Erkenntnisse der Nachrichtentechnik können von Fall zu Fall in die Drucktechnik übertragen werden.

Die Informationstheorie ist in einem höheren Maße allgemeinverständlich. Dadurch wird der Kontakt mit anderen Wissensgebieten, insbesondere mit der Nachrichtentechnik, der Physiologie und der Medizin erleichtert.

Die Systemtheorie dient fernerhin der objektiven Beurteilung der Druckverfahren im Zusammenwirken mit den Bewertungsverfahren der Höheren Konstruktionslehre sowie einer Wirtschaftlichkeitsrechnung.

Bei der Anwendung der Systemtheorie in der Praxis sind folgende Möglichkeiten denkbar:

Eine meßbare Druckgüte als Maß für die Druckqualität ermöglicht eine objektive Qualitätskontrolle während des Druckprozesses unter Einhaltung vorgegebener Toleranzen.

Eine objektive Qualitätskontrolle ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn an verschiedenen Orten das gleiche Druckprodukt hergestellt werden soll. Das Vorhandensein eines objektiven Gütemaßes für die Druckqualität verhindert auch Meinungsverschiedenheiten bei der Beurteilung von Drucken, insbesondere bei der Abnahme der Drucke durch den Kunden. Mit der Meßbarkeit der Druckgüte wird auch der Weg frei für eine Qualitätsregelung drucktechnischer Prozesse.

Die Systemtheorie ist fernerhin die Voraussetzung für das empfindungsgerechte Simulieren von Druckverfahren in Rechenautomaten. Dabei ließe sich der Einfluß unterschiedlicher Betriebsbedingungen auf das Druckergebnis leicht und schnell beurteilen; eine Optimierung der Prozesse wird möglich. Das Simulieren von Druckverfahren ist besonders bei der Einführung neuer Verfahren interessant, deren Betriebsverhalten im Rechner nachgebildet und damit ohne langwierige praktische Versuche beurteilt werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Dürner, H.
„Über den Einfluß der Druckgeschwindigkeit auf die Druckgüte im Bogen-Hochdruck“
FOGRA Institutsmitteilung 29/1 1963, insbes. S. 21
- [2] Brune, M., Diehl, H.
„Elektronisches Gerät zur objektiven Messung der Druckgüte von Volltonflächen“
FOGRA Institutsmitteilung 21/7 1960
- [3] Makkonen, T., Nordman, L.
„Measurement of unevenness in the reflectance of printed paper surfaces“
Paper and Timber 50 (1968), 9, S. 509/516
- [4] Parker, J.R.
„Einige Gesichtspunkte zur Messung der Bedruckbarkeit“
INCA monthly 11/1968, S. 17/24
- [5] Scheuter, K.R., Wolf, K.
„Beitrag zur Systemtheorie der Druckverfahren“
Druck-Print 2/1969, S. 133/152
- [6] Zwicky, F.
„Entdecken, Erfinden, Forschen“
Droemer-Knauer Verlag 1966
- [7] Kesselring, F.
„Bewertung von Konstruktionen“
Deutscher Ingenieurverlag GmbH, Düsseldorf 1951
- [8] Kesselring, F.
„Technische Kompositionslehre“
Springer-Verlag 1954
- [9] VDI-Richtlinie 2225
- [10] Rodenacker, W.
„Physikalisch orientierte Konstruktionsweise“
Konstruktion Nr. 18 (1966) Heft 7, S. 263/169

- [11] Berger, E.R.
„Informationstheoretische Grundlagen“ in Steinbuch, K.,
„Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung“
Springer Verlag 1962, S. 58
- [12] Zemanek, H.
„Elementare Informationstheorie“
Oldenbourg Verlag 1959, S. 18
- [13] Küpfmüller, K.
„Informationsverarbeitung durch den Menschen“
Nachrichtentechnische Zeitschrift NTZ 1959, H.2, S. 68/74
- [14] Peters, J.
„Einführung in die allgemeine Informationstheorie“
Springer Verlag 1967, S. 156
- [15] Neidhardt, P.
„Informationstheorie und automatische Informationsverarbeitung“
Berliner Union 1964, S. 75
- [16] Flechtner, H.J.
„Grundbegriffe der Kybernetik“
Wissenschaftliche Verlagsgemeinschaft, Stuttgart 1968, S. 75
- [17] = [14], Seite 64 u. 159
- [18] Shannon, C.E.
„A mathematical theory of communication“
Bell. Syst. techn. J. 27 (1948), S. 379/423, 623/653
- [19] Shannon, C.E., Weaver, W.
„The mathematical theory of communication“
Urbana, Illinois 1964
- [20] Fano, R.M.
„Informationsübertragung; eine statistische Theorie der Nachrichtenübertragung“
Oldenbourg Verlag 1966
- [21] = [15], Seite 181
- [22] = [12], Seite 11

- [23] Schouten, J.F.
„Nachrichten und Signal“
Nachrichtentechnische Fachberichte Bd. 6, 1957, S. II/1 u. II/2
- [24] = [15], Seite 87
- [25] Mac Adam, D.L.
„Quality of color reproduction“
Proc. Inst. Radio Engineers 39 (1951). S. 468/485
- [26] Moon, P., Spencer, D.E.
„A metric for colorspace“
J. opt. Soc. Amer. 33 (1943), S. 260/269
- [27] Meyer-Eppler, W.
„Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie“
Springer Verlag 1957, S. 231
- [28] = [14], Seite 197
- [29] = [15], Seite 138
- [30] = [11], Seite 60
- [31] Dubbel
„Taschenbuch für den Maschinenbau“
Bd. 1, Springer Verlag 1958, S. 38
- [32] = [27], Seite 233
- [33] = [2], Seite 3
- [34] = [14], Seite 174
- [35] = [14], Seite 71
- [36] = [15], Seite 101
- [37] = [14], Seite 179
- [38] = [20], Seite 161

- |39| = |27|, Seite 144
- |40| = |19|, Seite 48 ff
- |41| = |19|, Seite 12
- |42| Brillouin, L.
 „Science and Information Theory“
 Academic Press 1962, S. 152 ff
- |43| = |14| , Seite 28 ff, 153 ff, 159
- |44| Baehr
 „Thermodynamik“
 Springer Verlag 1966, S. 123 ff
- |45| Fratzcher, W. in Wukalowitsch, M. P. und Nowikow, I. I.
 „Technische Thermodynamik“
 VEB Fachbuchverlag Leipzig 1962, S. 509
- |46| = |44|, Seite 140 ff
- |47| = |38|, Seite 62

Lebenslauf

- 19.11.1939 in Würzburg geboren
Eltern: Emil Wolf, Obermontagemeister
und Elvira, geb. Heinze
- 1945–1949 Volksschule in Zell bei Würzburg
- 1949–1950 Humanistisches Gymnasium, Würzburg
- 1950–1956 Realgymnasium, Würzburg
- 1956 Mittlere Reife
- 1956–1958 Praktische Tätigkeit bei der Schnellpressenfabrik Koenig und Bauer AG,
Würzburg
- 1958–1961 Studium am Balthasar-Neumann-Polytechnikum, Würzburg
- 1961 Maschinenbauingenieur
- 1961–1963 Studium an der Technischen Hochschule Stuttgart, Fakultät Maschinenbau
- 1963–1965 Studium an der Technischen Hochschule Darmstadt, Fakultät Maschinenbau
- 1965 Abschluß des Studiums mit der Diplom-Hauptprüfung am 21.5.1965
- Seit 1965 Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl und Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Hochschule Darmstadt